

На правах рукописи

Косых Павел Андреевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ
ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМОЙ
ПЕРФОРАЦИИ НА ОСЕВОЕ СЖАТИЕ**

05.23.01 — «Строительные конструкции, здания и сооружения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет".

Научный руководитель:

Кашеварова Галина Геннадьевна,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН

Официальные оппоненты:

Галишников Вера Владимировна,
доктор технических наук, профессор,
директор департамента строительства
Инженерной академии Российского
университета дружбы народов

Конин Денис Владимирович,
кандидат технических наук,
заведующий сектором высотных
зданий и сооружений ЦНИИСК
им. В. А. Кучеренко (АО «НИЦ
«Строительство»)

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
"Липецкий государственный
технический университет"

Защита состоится 19 декабря 2018 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д218.005.05, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)», по адресу: 127994, г. Москва, ул. Новосущёвская, д. 22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Новосущёвская, д. 22 и на сайте <http://www.miit.ru/>.

Автореферат разослан «16» ноября 2018 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д218.005.05

кандидат технических наук

Шавыкина М. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время весьма эффективной технологией строительства быстровозводимых сооружений является каркасная система на основе легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК). Данная технология успешно применяется в малоэтажном жилищном, а также промышленном строительстве. Подобные конструкции могут быть использованы как экономичный вариант реализации национальной программы «Доступное и комфортное жилье», что, несомненно, значимо для экономики страны в целом.

Суть данной технологии заключается в использовании легких стальных тонкостенных оцинкованных перфорированных и неперфорированных профилей, которые образуют металлический каркас здания. Малый удельный вес конструкций (25-50 кг/м² для несущего металлического каркаса) делает возможным существенно экономить на строительных материалах и фундаменте, позволяет применять ЛСТК при реконструкции существующих зданий, осуществлять каркасное строительство в условиях тесной городской застройки без применения дорогостоящей грузоподъемной и транспортной техники.

Основой конструктивной системы зданий из ЛСТК является несущий каркас из гнутых профилей П-образного и С-образного сплошного сечения с толщиной до 2.5 мм, а также перфорированных профилей нестандартной конфигурации. Действующий свод правил, а также признанные и авторитетные документы (Североамериканский стандарт, нормы Еврокод и национальный стандарт Австралии) рассматривают конфигурации профилей со сплошной или мелкоперфорированной стенкой, оставляя без внимания профили сложной конфигурации с наличием частых, а также значительных по размерам усиленных вырезов на стенке.

Ввиду очевидного экономического эффекта, строительство из ЛСТК в России уже четко заняло свою нишу в области быстрого возведения зданий и сооружений. Но тонкостенные профили подвержены влиянию местной потери устойчивости, значительно снижающей несущую способность конструкции в целом. Кроме того, стальные элементы являются мостиками холода, снижая теплофизические показатели ограждающих конструкций. С целью преодоления этих негативных особенностей создаются специальные перфорированные профили нестандартной геометрии, главным отличием которых является наличие «усиленных» вырезов на стенке профиля. Но отсутствуют корректные методики их расчета, нет нормативной документации. Поэтому развитие теоретических положений расчета, обоснование конструктивных решений таких профилей, менее подверженных местной потере устойчивости и неблагоприятному влиянию высокой теплопроводности стали, является актуальным.

Степень разработанности темы. Исследованию устойчивости конструкций посвятили свои работы многие отечественные и зарубежные ученые: А. В. Александров, Н. А. Алфутов, А. С. Вольмир, С. П. Тимошенко, В. В. Болотин, А. А. Уманский, С. Б. Косицын, Л. С. Ляхович, А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер, Warner T. Koiter и др. Большой вклад в разработку теории устойчивости тонкостенных стержней внес профессор В. З. Власов, который, введя ряд

принципиально новых понятий, построил завершённую теорию изгибно-крутильных деформаций. Изучением и разработкой новых конструктивных решений несущих элементов каркасных зданий из тонкостенных профилей занимались и занимаются Г. И. Белый, И. И. Ведяков, В. В. Зверев, Л. В. Енджиевский, И. И. Крылов, В. В. Катюшин, В. В. Лалин, В. А. Рыбаков, А. Р. Туснин, О. А. Туснина, Э. Л. Айрумян, И. В. Астахов, В. Schafer, С. D. Moen и др. Исследования несущей способности профилей с непостоянной по длине формой поперечного сечения, обусловленной наличием перфорации или отверстий, представлены в работах Ватина Н. И., Гордеевой А. О., Назмеевой Т. В., Недвиги П. Н., Синельникова А. С., J. Kesti, P. Salmi, N. E. Shanmugam, M. Dhanalakshmi, Andrei Crisan и др.

Одним из основных направлений в данной области является исследование местной потери устойчивости стенки, которое представлено в работах Р. Б. Митчина, А. И. Притыкина, В. М. Добрачева, А. А. Ильиной, Е. В. Литвинова, и др. Но исследования в данном направлении ограничиваются определением форм потери устойчивости и соответствующих им критических сил — закритическое поведение не рассматривается, так как местная потеря устойчивости считается предельным состоянием. Специфика ЛСТК допускает работу при нагрузках, превышающих критическую силу местной потери устойчивости, что влияет на предельную несущую способность.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований, а также технической документации по вопросам расчета тонкостенных профилей со сложной перфорацией, выявил ряд проблемных вопросов. Во-первых, за «эффективную» площадь принимается наименьшая площадь поперечного сечения, в которую также включаются дополнительные элементы, обрамляющие отверстия. При этом считается, что полка и стенки полностью эффективны. Во-вторых, в расчетах используются характеристики поперечного сечения, не учитывающие их переменность по длине профиля. Методики расчета устойчивости тонкостенных металлических профилей нестандартной геометрии разработаны недостаточно. Эти задачи решаются в данной диссертационной работе.

Цель диссертационной работы состоит в разработке моделей и развитии методики расчета по предельным усилиям легкого стального профиля с нестандартной перфорацией и начальными геометрическими несовершенствами при осевом сжатии, используя современные компьютерные технологии и физический эксперимент.

Задачи диссертационной работы:

1. Проанализировать актуальные научные данные по задачам устойчивости легких стальных тонкостенных профилей со сложной перфорацией;
2. Провести лабораторные, также численные эксперименты по исследованию легких стальных тонкостенных профилей со сложной конфигурацией, используя физически/геометрически нелинейную постановку задачи, а также явное внесение начальных геометрических несовершенств;
3. Выявить зависимость критических напряжений от формы поперечного сечения профиля с нестандартной перфорацией;

4. Выявить влияние геометрических размеров, формы начальных геометрических несовершенств, формы вырезов на предельную несущую способность;
5. Разработать основные положения, регламентирующие создание конечно-элементных моделей *сплошных* тонкостенных профилей, результаты которых хорошо бы согласовывались с нормативными документами и с натурными экспериментами;
6. Разработать методику расчета несущей способности профиля сложной геометрии (на примере тонкостенного профиля типа «АТЛАНТ») с нестандартной перфорацией;
7. Разработать методику учета геометрических характеристик тонкостенных профилей с нестандартной перфорацией, имеющих непостоянную форму сечения по длине при построении механических условий прочности;

Научная новизна заключается в том, что:

— установлена зависимость несущей способности тонкостенных профилей с нестандартной перфорацией при осевом сжатии от размерных параметров, конфигурации вырезов и формы начальных геометрических несовершенств, что позволяет более точно предсказать предельно допустимую нагрузку;

— построен алгоритм определения «эквивалентных» геометрических характеристик профиля разных типоразмеров с непостоянной по длине формой поперечного сечения для вычисления критической силы потери устойчивости перфорированных профилей;

— разработан алгоритм определения «эффективных» характеристик тонкостенных профилей со сложной перфорацией, обеспечивающий возможность учета сложных форм местной потери устойчивости;

— получены аналитические зависимости, позволяющие выполнять расчет несущей способности перфорированных профилей сложной геометрии;

Теоретическая и практическая значимость работы:

— методика расчета предельной несущей способности легких стальных тонкостенных профилей с нестандартной перфорацией на осевое сжатие вносит вклад в развитие теории расчета тонкостенных конструкций;

— предложен алгоритм оценки прочностных характеристик конструкций для определения оптимальных параметров тонкостенных профилей сложной конфигурации;

— установлено влияние начальных геометрических несовершенств на предельную несущую способность легких стальных тонкостенных профилей;

— осуществлена проверка разработанной методики в конкретных и реальных условиях с подтверждающей документацией (акт о внедрении в ООО «АТЛАНТ» от 25 октября 2017 г.);

Методология и методы исследования. Данная работа явилась результатом использования численных, экспериментальных, вероятностных и эмпирических методов исследования. Широко применялся метод математического моделирования, заключающийся в построении моделей и исследовании свойств рассматриваемого объекта.

На защиту выносятся:

- принципы создания конечно-элементных моделей, корректно описывающих поведение тонкостенных сплошных профилей и с перфорацией (на примере профиля «АТЛАНТ»);
- результаты компьютерного моделирования и расчетов на общую и местную устойчивость тонкостенных профилей с перфорацией;
- результаты экспериментальных исследований тонкостенных профилей на устойчивость и сравнение с результатами численного моделирования;
- методика расчета несущей способности тонкостенных профилей с перфорацией;
- результаты влияния размеров поперечного сечения, величины и вида конечного элемента, распределения начальных геометрических несовершенств на предельную несущую способность легких стальных тонкостенных профилей;

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием научных положений в области механики деформируемого твердого тела и строительной механики; теории расчета тонкостенных металлических конструкций; современных методов проведения экспериментальных исследований; использованием верифицированного расчетного конечно-элементного комплекса ANSYS; проверкой теоретических положений экспериментальными исследованиями, тождественностью с результатами, полученными в экспериментах.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались на: III Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения») (МГСУ, Москва, 2014); V Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Иркутск, 2014); VII Всероссийской молодежной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные технологии в строительстве. Теория и практика» (ПНИПУ, Пермь, 2015), Всероссийской научной конференции «Проблемы деформирования и разрушения материалов и конструкций» (ПНИПУ, Пермь, 2015), VIII Всероссийской молодежной конференции аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика», (ПНИПУ, 2016, 2017), Межвузовском научном семинаре «Геометрия и расчет тонких оболочек неканонической формы» (РУДН, 2017), VII Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения», 2018).

Публикации. По исследуемой теме опубликовано 8 работ, в том числе 4 из них в научных журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий» ВАК.

Структура и состав диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы (89 наименований) и содержит 171 страницу машинописного текста, 102 рисунка и 37 таблиц, два приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, описаны цели и задачи и исследования, сформулирована научная новизна, ее практическая и теоретическая значимость.

В первой главе дано краткое описание технологии строительства с применением легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК). Отмечены основные достоинства (легкость, технологичность монтажа и производства, высокие эксплуатационные качества) и выделены основные недостатки, препятствующие широкому распространению технологии (подверженность местной потере устойчивости сплошных и перфорированных профилей, а также значительное снижение теплозащитных характеристик ограждающих конструкций).

Рассмотрены работы по исследованию местной потери устойчивости и закритической работы тонкостенных конструкций, и отмечен большой вклад в развитие данного направления Тимошенко, Гудбера, F. Bleich, Vulson и Allen, С. Б. Косицына, Г. А. Мануйлова и др.

В настоящее время для учета местной потери устойчивости используется метод «редуцирования», основоположником которого считается Т. Карман. Представлены ключевые идеи подхода (такие как "эффективная" ширина, декомпозиция сечения), а также основные зависимости, предложенные Дж. Винтером и внесенные в ряд действующих нормативных документов.

Проанализированы проблемы общей устойчивости тонкостенных профилей, исследованием которых занимались многие учёные, включая Сен-Венана, Прандтля, Тимошенко, Блейха, В. З. Власова и др. Рассмотрены основные положения теории изгибно-крутильных деформаций тонкостенных стержней открытого профиля. Приведен анализ послекритического взаимодействия местной и общей форм потери устойчивости.

Проведен анализ возможных путей повышения эксплуатационных характеристик профилей ЛСТК, и в качестве решения предложено использовать перфорированные, а также профили с отверстиями на стенке, сопоставимыми с ее размером (см. рисунок 1).

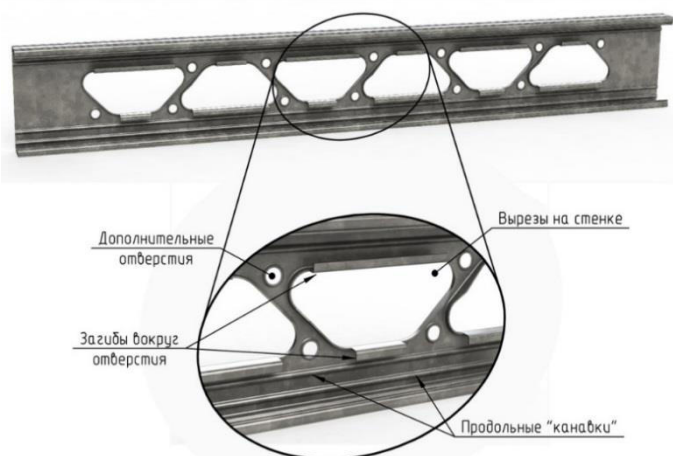


Рисунок 1 — Профиль со сложной перфорацией (марки «АТЛАНТ»)

В поперечном сечении данные профили представляют собой традиционный С-образный профиль с дополнительными элементами жесткости. Отличительной особенностью этих профилей является наличие усиленных основных и дополнительных отверстий на стенке, которые вырубаются при помощи штампа до процесса профилирования.

Дополнительные элементы жесткости способствуют снижению гибкости стенки, что позволяет повысить критическую нагрузку местной потери устойчивости и несущую способность профилей в целом по сравнению со сплошными С-образными профилями.

По результатам обзора сделан вывод об отсутствии полноценных инженерных методов расчета несущей способности, применимых к тонкостенным профилям со сложной перфорацией.

Вторая глава работы посвящена вопросам устойчивости *сплошного* С-образного профиля. Описаны основные подходы к созданию компьютерных расчетных моделей: задание граничных условий (рисунки 2, 3); определение момента исчерпания несущей способности (рисунок 4); выбор модели материала, оптимального типа и размера конечного элемента.

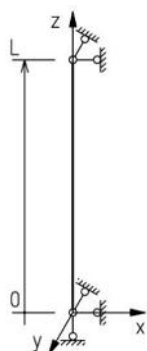


Рисунок 2 — Условная расчетная стержневая модель

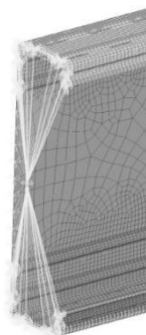


Рисунок 3 — Перенос граничных условий на оболочечную модель

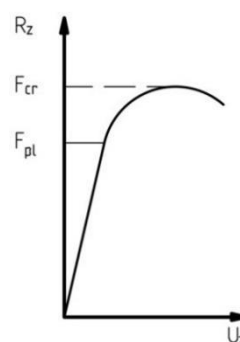


Рисунок 4 — Определение предельной несущей способности

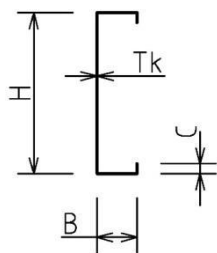


Рисунок 5 — Поперечное сечение профиля

Моделирование нагружения осуществлялось перемещением свободного конца профиля по направлению к опорному сечению. В процессе расчета отслеживалась реакция в опорном сечении R_z , соответствующая: а) точке перегиба на графике «опорная реакция–перемещение свободного конца» — F_{cr} ; б) началу пластического деформирования — F_{pl} .

Несущая способность профилей определялась методом конечных элементов в расчетном комплексе ANSYS. Рассматривались разные типы и размеры КЭ, обеспечивающих приемлемый уровень сходимости численных методов, для существенно нелинейных задач, где присутствуют значительные углы поворота или деформации. В итоге выбор был сделан в пользу оболочечного элемента SHELL181 как оптимального с точки зрения соотношения точности и затраченного времени.

Проведена серия расчетов разных типоразмеров моделей, отличающихся геометрическими параметрами (рисунок 5): высота стенки H — 152, 203, 254, 305 мм; ширина полок B — 41.3, 50.8, 63.5 мм; толщина металла Tk — 1.0, 1.5, 2.0 мм; длина профиля L — 0.5, 1.5, 2.75, 4.0 м (всего 144 модели).

Оценка несущей способности сплошных профилей осуществлялась по деформированной схеме. В конструкцию явно вносились общие (изгибные) и

местные начальные геометрические несовершенства, форма которых определялась по результатам линейного расчета на устойчивость (ANTYPE, BUCKLE). В ходе проведенных расчетов установлено, что в подавляющем большинстве случаев (96%) определяющим критерием является либо потеря устойчивости по *изгибной форме*, либо начало пластического деформирования.

Исследовано влияние распределения начальных геометрических несовершенств на несущую способность *сплошного* профиля. Установлено, что несущая способность: а) не зависит от распределения местных начальных несовершенств; б) зависит от направления внесения общего начального несовершенства.

Для сравнения результатов выполнены численные расчеты исследуемых профилей по методике Eurocode, который предусматривает геометрически и физически нелинейную постановку задачи. Кроме того, учитывались явно внесенные в модель начальные геометрические несовершенства с учетом рекомендаций по их размерам. Относительная погрешность между численными расчетами и инженерной методикой Eurocode не превысила 9% при принятии за предельную несущую способность нагрузки, соответствующей началу пластического деформирования.

С целью верификации расчетных моделей проведены натурные эксперименты трех образцов профилей, для чего был создан испытательный стенд (рисунок 6).

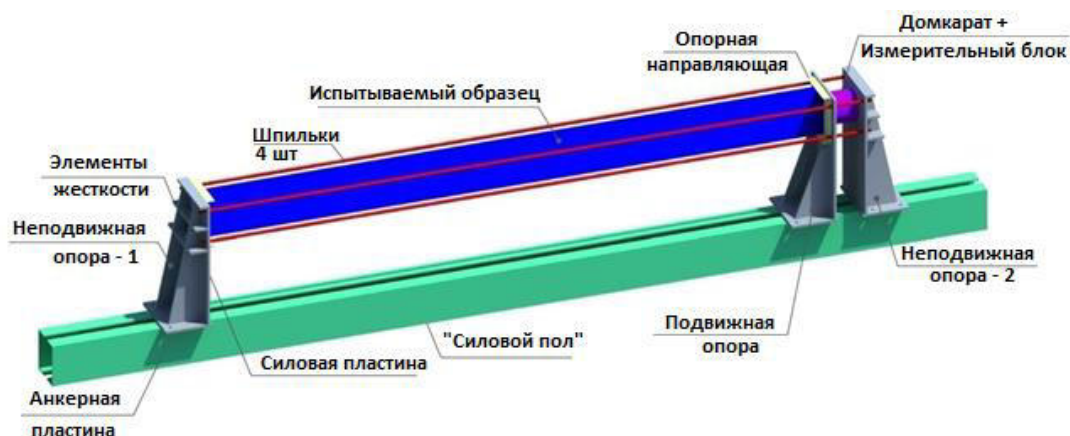


Рисунок 6 — Испытательный стенд

Определены точные геометрические характеристики образцов, включая начальные геометрические несовершенства: 1) отклонение от перпендикулярности полки профиля к стенке; 2) выпуклость стенки профиля; 3) серповидность в направлении оси Y; 4) серповидность в направлении оси X. Посредством гравиметрического метода определена толщина цинкового покрытия стали для вычисления толщины основного металла.

В расчетном комплексе ANSYS создана конечно-элементная модель, испытываемого образца *с учетом начальных зазоров, в результате неидеального примыкания образца к опорным пластинам*. Для этого использовались контактные элементы и учитывалось трение между образцом и опорами. По результатам проведенных натурных и вычислительных экспериментов получены зависимости: между перемещением свободной опоры и показаниями электронного динамометра

— в случае натурального эксперимента, и перемещением свободной опоры, и значением опорной реакции — в численном эксперименте. На рисунке 7 приведены графики результатов натурального и вычислительного экспериментов. Относительная погрешность определения осевой сжимающей силы составила не более 7%, что говорит о приемлемом уровне тождественности результатов. С точки зрения картины деформирования также наблюдается тождественность результатов (рисунок 8).

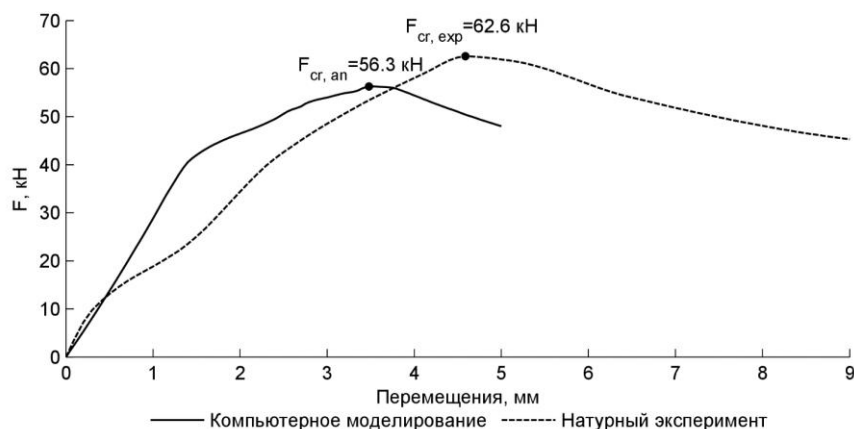


Рисунок 7 — Сравнение результатов натурального и численного экспериментов

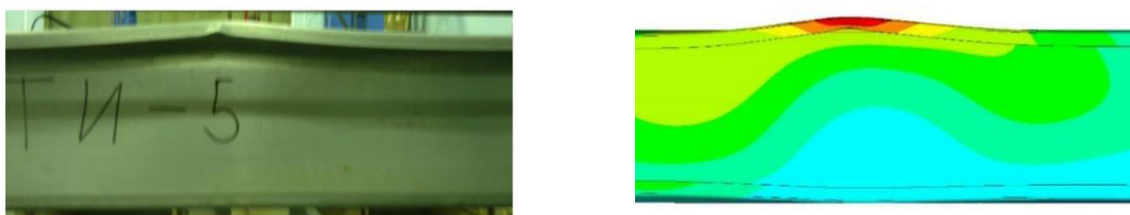


Рисунок 8 — Картина деформирования в натурном эксперименте и в компьютерной модели

В **третьей главе** на основе проведенных исследований для сплошного тонкостенного профиля разрабатывалась «инженерная» методика расчета несущей способности профилей со сложной перфорацией (на примере профилей марки «АТЛАНТ»). Методика строится на основе подхода, описанного в действующем СП и Еврокоде, который предусматривает учет геометрической и физической нелинейности, явного внесения в модель начальных геометрических несовершенств и использования возможностей компьютерного моделирования.

Форма поперечного сечения рассматриваемых профилей, а соответственно и геометрические характеристики непостоянны по длине профиля и неясно, какое из множества поперечных сечений следует использовать при определении критических сил. Поэтому при разработке методики предлагается определять «эквивалентные» геометрические характеристики сечения: *изгибные, крутильную и осевую жесткости*, из условия равенства перемещений и напряжений сплошного профиля и профиля с перфорацией.

Наличие в профиле отверстий, дополнительных отгибов и продольных «каналов» оказывают существенное влияние на характер закритического напряженно-деформированного состояния.

Для исследования закритической работы *стенки* и *полок* вводится понятие «эффективной» площади поперечного сечения A_{eff} , и чтобы ее определить, необходимо провести дополнительные исследования их местной потери устойчивости.

Наконец необходимо подобрать оптимальную кривую критических напряжений, соответствующую сложной конфигурации профиля.

«Эквивалентные» геометрические характеристики сечения:

$$J_{x,eq} = \frac{F_x L_x^3}{3Eux}, \quad J_{y,eq} = \frac{F_y L_y^3}{3Euy}, \quad A_{eq} = \frac{F_z L_z}{Euz} \quad (1)$$

предлагается определять из условия равенства максимальных перемещений/напряжений в (сплошном) профиле с постоянной формой поперечного сечения по длине, с соответствующими перемещениями/напряжениями в исследуемом профиле (рисунок 9).

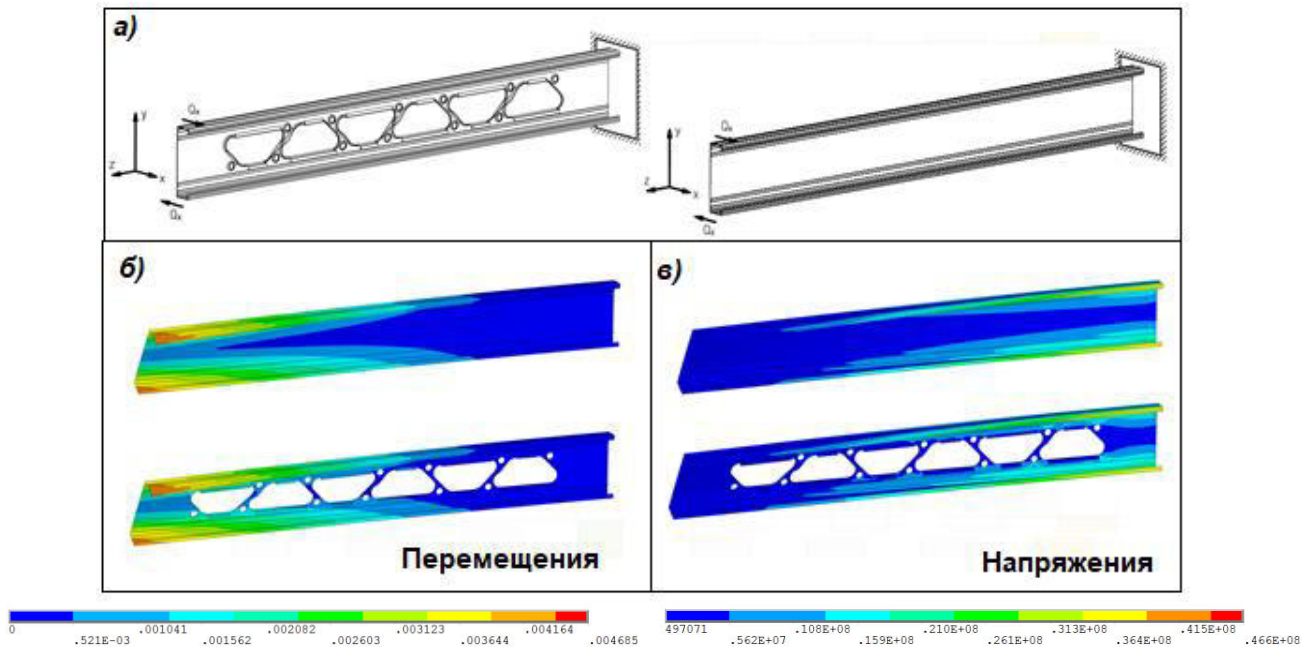


Рисунок 9 — Расчетные модели для определения «эквивалентных» геометрических характеристик и картины сравнительного анализа НДС

В результате расчетов в ПК ANSYS установлено, что наличие отверстий на профиле снижает его главные моменты инерции в среднем на 20%, площадь на 30%. При этом крутильные характеристики профиля остаются практически неизменными и могут определяться как для сплошного профиля.

При исследовании *закритической* работы стенки/полки на устойчивость применен метод редуцирования, который предполагает декомпозицию поперечного сечения.

Расчетная модель стенки для расчета *местной* потери устойчивости, представлена в виде пластинки, шарнирно закрепленной вдоль продольных граней, нагруженной продольной силой Q_z (рисунок 10). Определены первые формы потери устойчивости исследуемой модели — во всех случаях стенка волнообразно деформировалась как единое целое (рисунок 11). *Данная форма потери*

устойчивости не рассматривается в нормативных документах и нуждается в изучении.

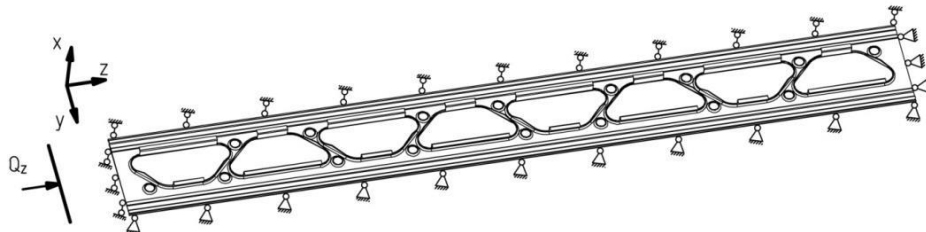


Рисунок 10 — Расчетная модель стенки профиля

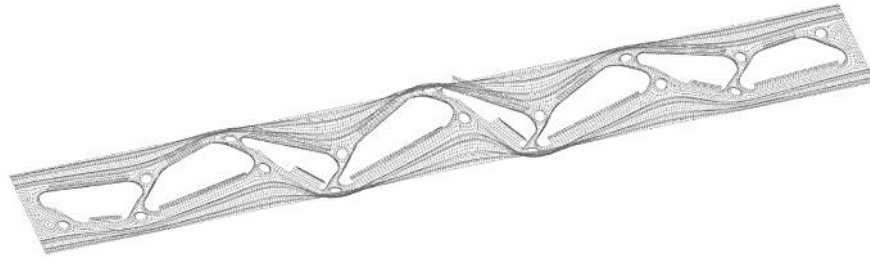


Рисунок 11 — Типичная первая форма потери устойчивости стенки профиля

В результате линейного расчета на устойчивость определены значения критических сил Q_{cr} , соответствующих местной потере устойчивости, а также получена эмпирическая зависимость критических напряжений σ_{cr_w} от геометрических параметров сечения (рис.5) для стенки профиля:

$$\sigma_{cr_w} = -1383 + 6.542 \cdot 10^3 \cdot H + 3.616 \cdot 10^6 \cdot Tk - 1.673 \cdot 10^7 \cdot H \cdot Tk + 1.6 \cdot 10^7 \cdot Tk^2 \quad (2)$$

Здесь и далее для получения эмпирических зависимостей использовался регрессионный анализ. Расчеты и обработка результатов вычислительных экспериментов, выполненных в ПК ANSYS, проводились в пакете математического моделирования MATLAB.

Для каждого типоразмера профиля вычислены полные "нередуцированные" площади. Данную площадь составляют участки, активно вовлеченные в работу, на которых напряжений существенно превышают прочие (рисунок 12).

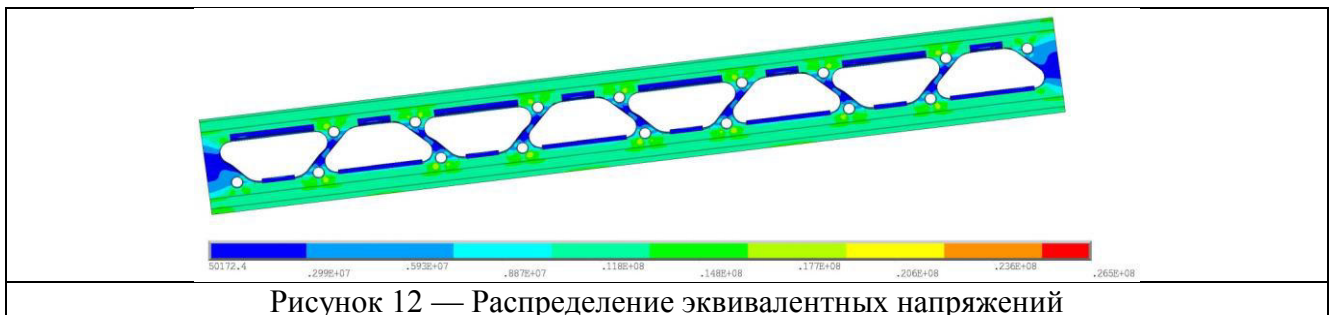


Рисунок 12 — Распределение эквивалентных напряжений

Исследована работа стенки в закритической стадии, где распределение напряжений по поперечному сечению носит неравномерный характер — наблюдается их стремительный рост вдоль продольных граней стенки. Для их определения нормативными документами вводится понятие «эффективной»

площади A_{eff_w} — такой площади, что отношение действующей сжимающей силы F к данной «эффективной» площади дает значение максимальных напряжений σ_{max} . Для ее определения предлагается отслеживать максимальные напряжения в стенке профиля при пошаговом возрастании нагрузки:

$$A_{eff_w,i} = F_i / \sigma_{max,i} \quad (3)$$

В результате для стенки профиля высотой $H=203$ мм получена зависимость, связывающая редуцированный коэффициент и действующие напряжения:

$$\rho = -0.359\lambda^2 + 0.2293\lambda + 0.8785, \quad (4)$$

где $\rho = A_{eff_w} / A_{gr_w}$ — редуцированный коэффициент; $\lambda = \sqrt{\sigma / \sigma_{cr}}$ — условная гибкость стенки.

Используя эту зависимость, можно определить напряжения в стенке в закритической стадии. При меньшей высоте стенки профиля редуцированный коэффициент можно принять равным единице.

Расчетная модель полки профиля представлена на рисунке 13. Стенка профиля заменена пружинами кручения. Для определения жесткости пружин кручения C_τ необходимо вернуться к исследованию стенки профиля (см. рисунок 14).

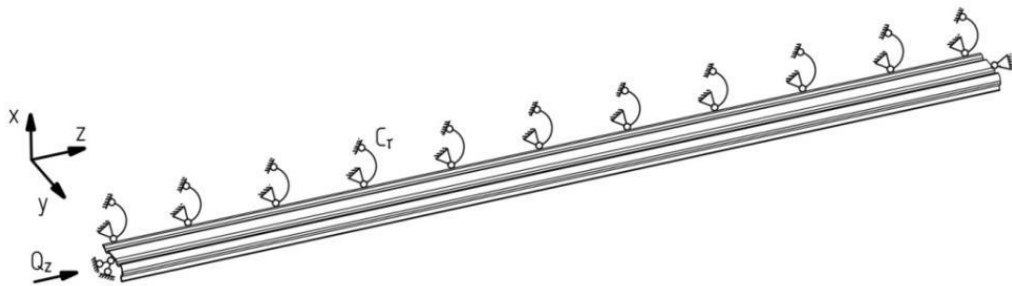


Рисунок 13 — Расчетная модель полки профиля

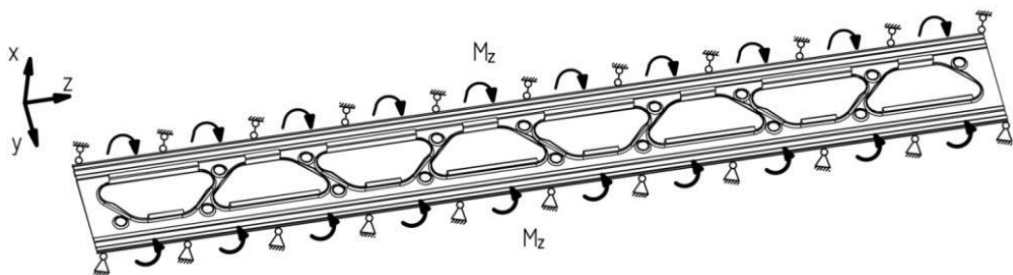


Рисунок 14 — Модель для определения жесткости пружин кручения C_τ

К продольным граням стенки приложен равномерно распределенный изгибающий момент M_z . В ходе расчетов необходимо определить углы закручивания $rotz$, соответствующие крайним продольным узлам, по которым определяется искомая жесткость $C_\tau = M_{z,i} / rotz_i$.

В результате вычислительных экспериментов для каждого типоразмера профиля получено неравномерное распределение крутильной жесткости по длине

(рисунок 15), которое в дальнейшем вносилось в исходную расчетную модель полки.

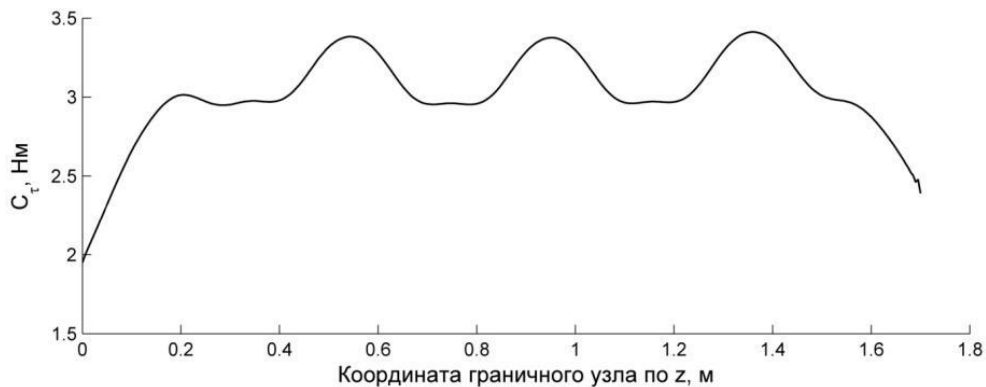


Рисунок 15 — Характерное распределение крутильной жесткости по длине

Далее по результатам линейного расчета на устойчивость были определены характерные формы потери устойчивости полки (рисунок 16) и получены соответствующие им эмпирические зависимости для определения критических напряжений:

$$\sigma_{cr-f} = 112 - 1.2 \cdot 10^3 \cdot H + 6.1 \cdot 10^5 \cdot Tk + 2.99 \cdot 10^3 \cdot B - 6.68 \cdot 10^6 \cdot Tk \cdot B \quad (5)$$

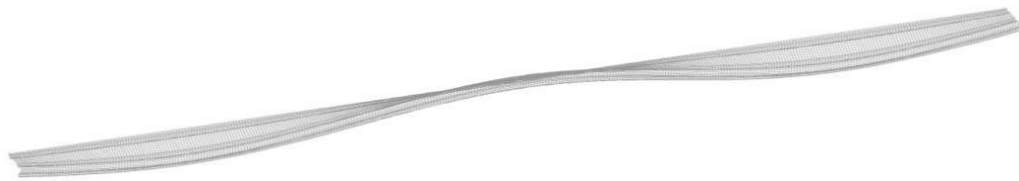


Рисунок 16 — Характерная форма потери устойчивости полки

Для определения напряжений в полке в закритической стадии с использованием регрессионного анализа получена зависимость (6), косвенно связывающая между собой действующие напряжения в полке с приложенной нагрузкой.

$$\rho = -0.171\lambda^2 - 0.3815Tk^2 + 1.0793Tk + 0.0554 + (B - 41.3) \cdot (0.0189Tk^2 - 0.055Tk + 0.0402). \quad (6)$$

Используя те же подходы, что и для сплошного С-образного профиля, проанализировано влияние начальных геометрических несовершенств на несущую способность исследуемых профилей. Аналогично установлено, что 1) распределение местных начальных несовершенств практически не оказывает влияния на несущую способность профиля; 2) профили предрасположены терять *общую устойчивость* в определенном направлении. Первой общей формой потери устойчивости является изгибная форма.

В соответствии с рекомендациями нормативных документов подбиралась оптимальная кривая критических напряжений, соответствующая сложной конфигурации профиля.

В нормативах документах коэффициент устойчивости χ предлагается определять на основе параметра Φ и условной гибкости профиля $\bar{\lambda}$:

$$\Phi = \beta[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \rightarrow \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (7)$$

Поиск оптимальной кривой осуществляется на основе подбора параметров: коэффициента α , зависящего от формы поперечного сечения, и коэффициента β , косвенно определяющего предел сходимости кривой при $\lambda \rightarrow 0,2$. По результатам подбора найдена оптимальная зависимость для параметра Φ :

$$\Phi = 0.58[1 + 0.37(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \quad (8)$$

На основе данной зависимости получена кривая критических напряжений $\chi(\bar{\lambda})$, на основе которой проведена серия «инженерных» расчетов, результаты которой совместно с результатами компьютерного моделирования графически представлены на рисунке 17.

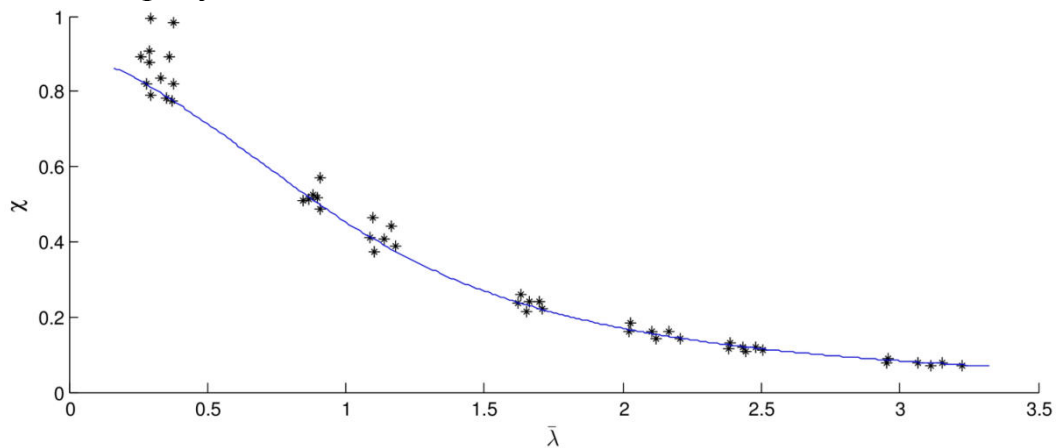


Рисунок 17 — Кривая критических напряжений $\chi = \chi(\bar{\lambda})$

Исследовано влияния формы выреза на значение несущей способности. Рассмотрено три конфигурации профиля: с квадратными, трапециевидными и треугольными отверстиями (рисунок 18) со следующими геометрическими параметрами: толщина профиля — 1,0, 2,0 мм; высота стенки — 152,4, 203,2 мм; ширина полков — 41,3, 50,8 мм; длина профиля — 1,5, 2,75 м.

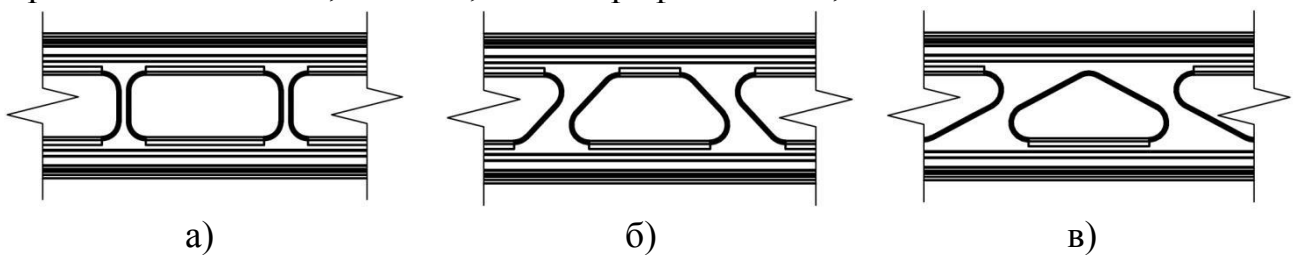


Рисунок 18 — Конфигурации исследуемых вырезов: а) квадратные; б) трапециевидные; в) треугольные

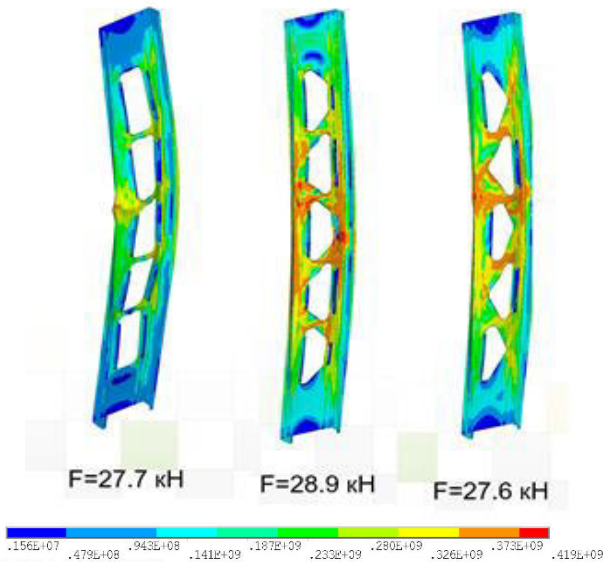


Рисунок 19 — Сравнение напряженно-деформированного состояния

В результате установлено, что форма выреза не оказывает существенного влияния на несущую способность профиля (рисунок 19). Средняя относительная погрешность составила 3.5%.

Проведено сравнение несущей способности сплошного С-образного профиля и профиля сложной конфигурации. По результатам сравнения установлено, что несущая способность исследуемых профилей может быть, как выше, так и ниже сплошных С-образных профилей.

Для определения *рациональной области применения* проведено сравнение несущей способности исследуемых профилей F_{at} и сплошных С-образных профилей F_c . Для оценки введен параметр $\delta_c = (F_{at} - F_c)/F_c \cdot 100\%$ и выполнен статистический анализ распределения в зависимости от геометрических характеристик H , B , Tk , L .

Расчеты и обработка результатов проводилась в пакете математического моделирования MATLAB. В результате получена формула:

$$\delta_c = 3.38 + 11.3 \cdot H_{sc} + 5.16 \cdot B_{sc} - 4.34 \cdot L_{sc} - 8.43 \cdot Tk_{sc} \quad (8)$$

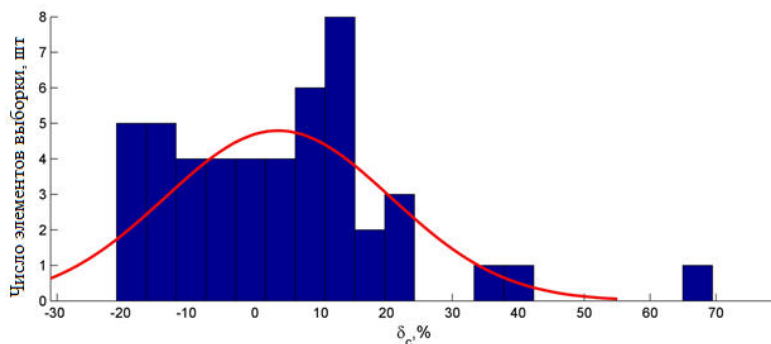


Рисунок 20 — Распределение параметра δ_c

В результате статистического анализа (рис. 20) определена рациональная область применения исследуемых профилей "АТЛАНТ": высота стенки $H \geq 200$ мм, ширина полок $B \geq 50$ мм, расчетная длина из плоскости не более 2.75 м, толщина металла Tk не более 2 мм.

Четвертая глава посвящена сравнению результатов натурных экспериментов перфорированных профилей с результатами, полученными на основе предложенных расчетных моделей. В первой части главы описан эксперимент, проведенный на разработанном стенде (рисунок 6).

Предварительно замерялись геометрические параметры образца: высота стенки H , ширина полок B , длина загиба C , толщина металла Tk , длина элемента L .

Каждый параметр замерялся несколько раз в различных областях профиля, вычислялись средние значения, которые в дальнейшем использовались для создания конечно-элементной модели.

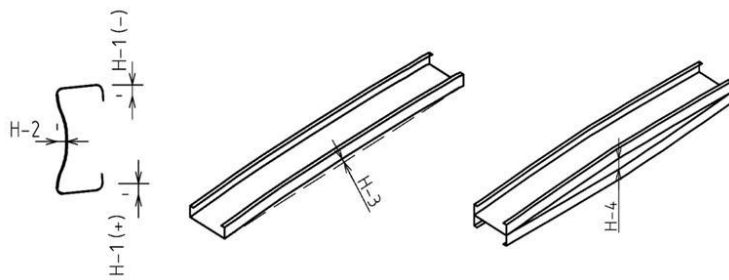


Рисунок 21 — Начальные геометрические несовершенства

Кроме основных геометрических параметров для создания конечно-элементной модели требуется информация о распределении и величине начальных геометрических несовершенств. На испытываемом образце замерено четыре вида начальных несовершенств:

отклонение от перпендикулярности полки профиля к стенке (Н-1); выпуклость стенки профиля (Н-2); серповидность в направлении оси Y (Н-3); серповидность в направлении оси X (Н-4) (рисунок 21).

В расчетном комплексе ANSYS создана конечно-элементная модель, испытываемого образца. По результатам проведенных натурных и вычислительных экспериментов получены зависимости: между перемещением свободной опоры и показаниями электронного динамометра — в случае натурального эксперимента, и перемещением свободной опоры и значением опорной реакции — в численном эксперименте (рисунок 22). Анализ этих зависимостей показал приемлемый уровень тождественности предельной несущей способности. Значение, соответствующее натурному эксперименту составило $F_{cr,exp} = 51.3 \text{ кН}$, численному эксперименту — $F_{cr,ans} = 55.1 \text{ кН}$ (относительная погрешность 6.9%). Перемещение в момент достижения предельной несущей способности по результатам натурального эксперимента составило $\Delta_{cr,exp} = 3.83 \text{ мм}$, численного эксперимента — $\Delta_{cr,ans} = 3.4 \text{ мм}$.

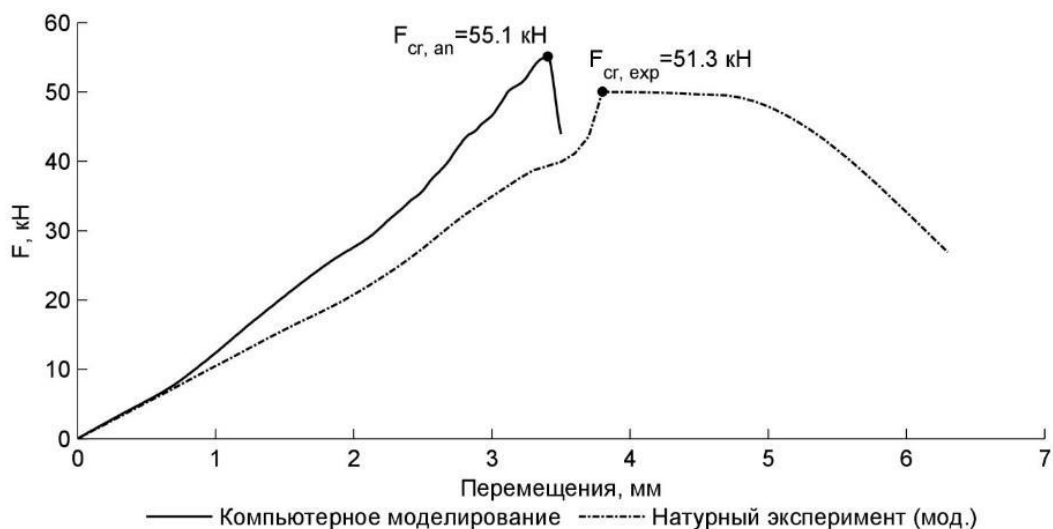


Рисунок 22 — Сравнение результатов натурального и численного экспериментов

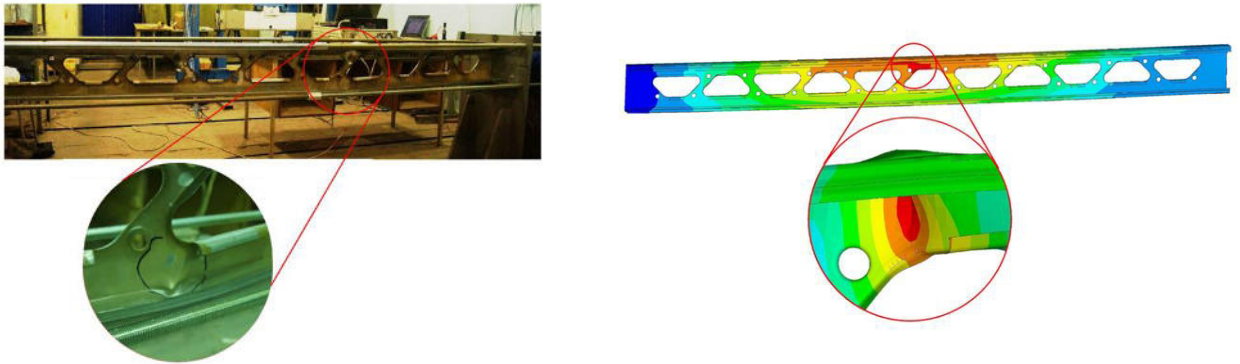


Рисунок 23 — Локальная картина деформирования образца: а) натуральный эксперимент; б) компьютерное моделирование

Кроме того, для верификации использованы результаты натурального эксперимента, проведенного на базе канадской лаборатории «Bodycote». В ходе эксперимента было испытано по три образца двух типоразмеров профилей, отличающихся толщиной стали (S1–S6). До эксперимента на каждом образце в трех местах (начало, середина, конец) проводились замеры основных геометрических параметров, получены диаграммы деформирования стали для каждого типоразмера, определена толщина цинкового покрытия образцов. В результате эксперимента для каждого из образцов были получены графики, описывающие зависимость между сжимающей нагрузкой и показаниями перемещения вдоль образца, а также вертикальные перемещения полки профиля в середине пролета. В расчетном комплексе ANSYS также создана серия расчетных моделей (ANS1-х и ANS2-х). Недостатком натурального эксперимента являлось отсутствие замеров начальных геометрических несовершенств. Для их учета использовался вероятностный подход, который подразумевает расчет нескольких моделей с различными по величине и форме распределениями начальных несовершенств. Величина несовершенств определялась на основе нормального распределения. Предполагалось, что распределение начальных несовершенств реальных образцов входит в диапазон, захваченный компьютерным моделированием. Таким образом, результаты натуральных экспериментов оказались внутри мнимого "коридора", созданного результатами компьютерного моделирования (рисунок 24). Диапазон результатов компьютерного моделирования в плане максимального сжимающего усилия для 1-го типоразмера составил 67.8–92.1 кН, при результатах натурального эксперимента: 87.8, 73.1, 80.7 кН. Диапазон результатов компьютерного моделирования в плане максимального сжимающего усилия для 2-ого типоразмера составил 24.5–34.6 кН, при результатах натурального эксперимента: 25.8, 24.2, 26.1 кН.

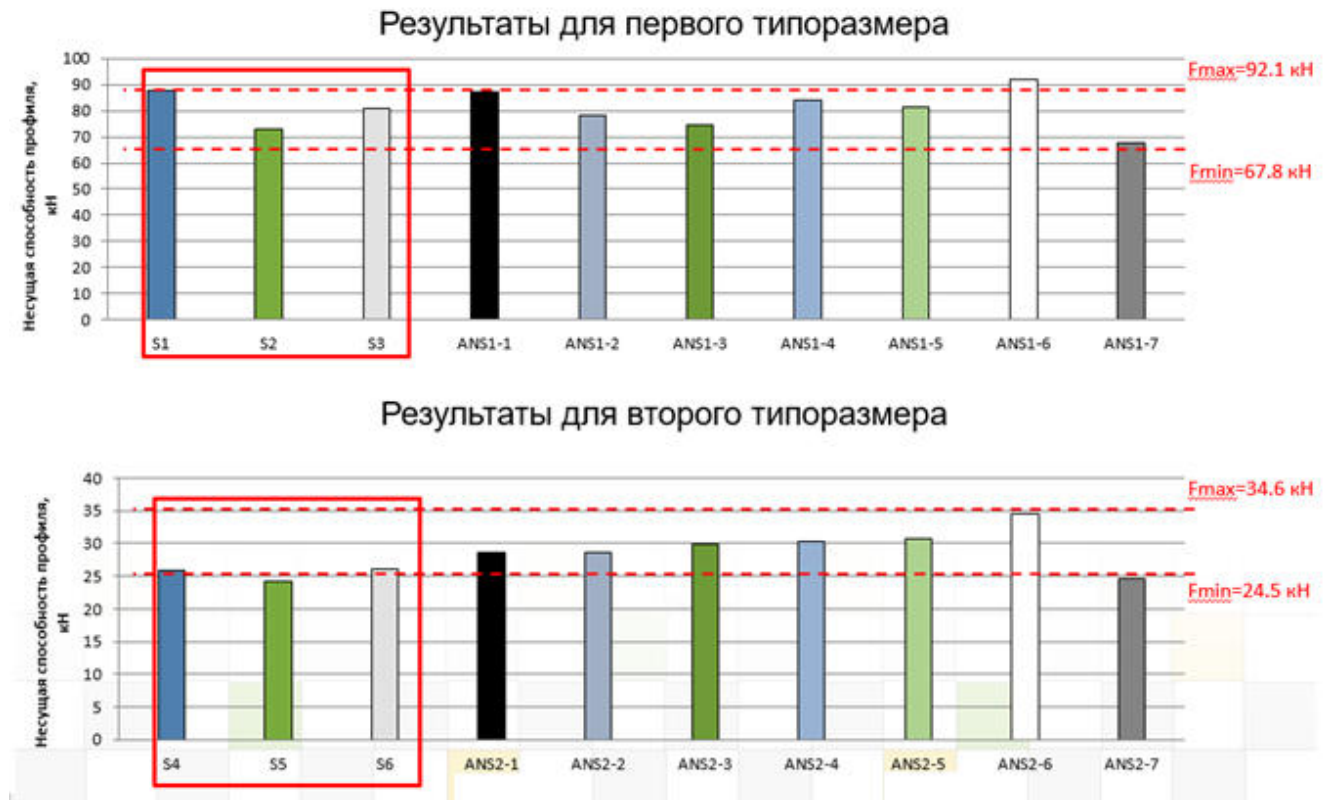


Рисунок 24 — Результаты натурального эксперимента и компьютерного моделирования

Также были получены идентичные картины деформирования, представленные на рисунке 25.

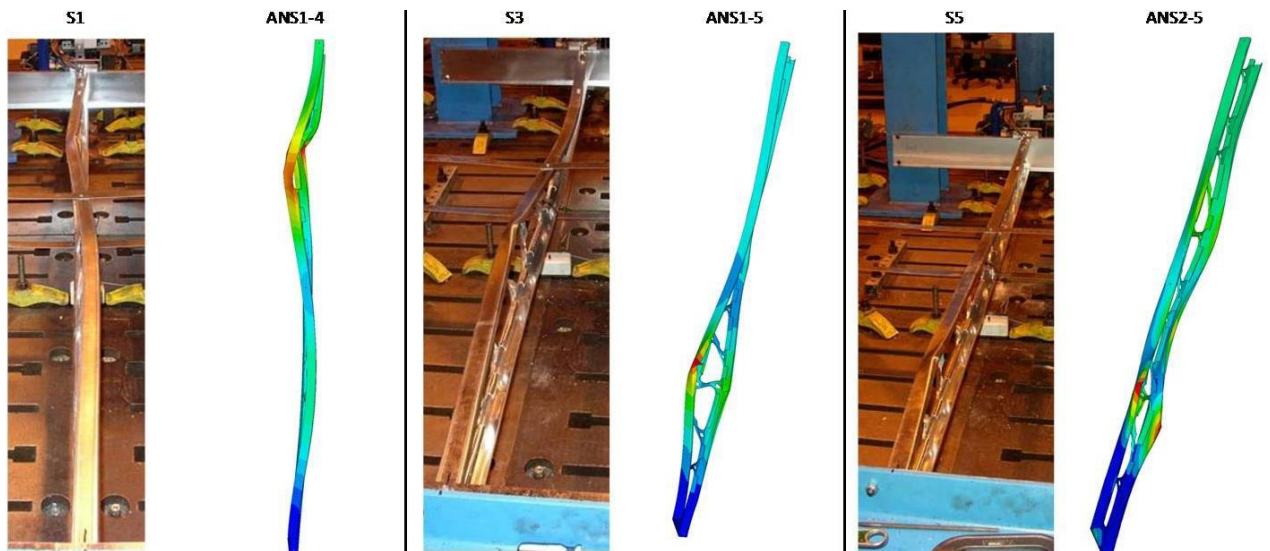


Рисунок 25 — Сравнение картин деформирования натурального эксперимента и компьютерного моделирования

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнен аналитический обзор научных публикаций отечественных и зарубежных ученых по расчету устойчивости легких стальных тонкостенных профилей. Установлено, что выполнить расчет несущей способности профилей со сложной перфорацией, главным отличием которых является наличие «усиленных»

вырезов на стенке профиля, по существующим методикам не представляется возможным.

2. Разработана методика определения предельной несущей способности тонкостенных профилей со сложной перфорацией на осевое сжатие с применением численного моделирования. Для этого решалась *геометрически и физически* нелинейная задача. Статистические методы регрессионного анализа и проведенные вычислительные эксперименты легли в основу «инженерной» методики, которая представляет собой развитие аналитического метода расчета Еврокода и СП, применительно к тонкостенным профилям с нестандартной перфорацией и с учетом геометрических несовершенств.

3. Установлено, что форма местных начальных несовершенств не оказывает влияния на значение предельной несущей способности тонкостенных профилей. Обнаружена предрасположенность С-образных профилей терять общую устойчивость в определенном направлении.

4. Первая форма потери устойчивости стенки исследуемых профилей, как и сплошной стенки, имеет волнообразный характер. При этом стенка деформируется как единое целое. Форма потери устойчивости полки перфорированных профилей соответствует форме потери устойчивости сечения профиля в целом. Первой общей формой потери устойчивости исследуемых профилей является изгибная форма.

5. По результатам численных исследований предложен метод определения «эквивалентных» геометрических характеристик поперечных сечений перфорированных профилей с непостоянной по длине формой поперечного сечения. Установлено снижение осевой/изгибной жесткости перфорированного профиля в обеих главных плоскостях по сравнению с профилем сплошного сечения. Установлено отсутствие влияние усиленных вырезов на крутильные характеристики.

6. В результате статистического анализа определена рациональная область применения исследуемых профилей: высота стенки $H > 200$ мм, ширина полок $B > 50$ мм, расчетная длина из плоскости не более 2.75 м, толщина металла T_k не более 2 мм.

7. Для верификации расчетных моделей проведен сравнительный анализ результатов натуральных и численных экспериментов. В сравнении задействованы как эксперименты, выполненные самостоятельно, так и проведенные Канадской лабораторией «Bodycote». Расчетная конечно-элементная модель полностью имитировала поведение испытуемого образца: включала начальные несовершенства, точные геометрические характеристики и условия примыкания образца к опорам, учитывалось их контактное взаимодействие. Сопоставление результатов численных исследований с экспериментальными данными показало приемлемый уровень тождественности результатов несущей способности (погрешность не более 10.0 %) и картины деформирования.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

— в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. *Кашеварова Г. Г., Косых П. А.* Определение несущей способности легких стальных тонкостенных конструкций на основе компьютерного моделирования // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering — 2014 — vol.10 — iss. 2— pp. 85-92

2. *Косых П. А.* Сравнение несущей способности легких стальных тонкостенных профилей различной конфигурации на основе компьютерного моделирования // Вестник ТГАСУ — 2015 — №2

3. *Косых П. А.* Определение эквивалентных геометрических характеристик легких стальных холоднокатаных профилей с перфорацией «АТЛАНТ» // Строительная механика и расчет сооружений — 2016 — №5.

4. *Galina G. Kashevarova, Pavel A. Kosykh* The comparative analyses of the results of real and numerical experiments for defining the ultimate bearing capacity of light gauge steel studs “ATLANT”// International Journal for Computational Civil and Structural Engineering — 2018 — vol.14 — iss. 3— pp. 50-58.

— в других изданиях

5. *Косых П. А., Кашеварова Г. Г.* Влияние местной потери устойчивости на несущую способность пластин сложной конфигурации // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии (электронный интернет-журнал) — 2016 — №6.

6. *Кашеварова Г. Г., Бурков А. И., Косых П.А.* Анализ влияния легких стальных тонкостенных профилей на теплосоппротивление ограждающих конструкций // Строительная механика и расчет сооружений — 2014 — №6

7. *Косых П.А.* Влияние сквозных металлических включений на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура — 2012 — №1 — стр. 142–146

8. *Kashevarova G., Kosykh P.* Influence Analysis of Cold Formed Steel Members on Thermal Characteristics of Building Envelopes // Applied Mechanics and Materials —2014 — Vols. 670-671 — pp. 466–473.