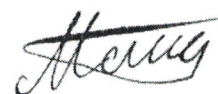


На правах рукописи



ЛИПЛЕНКО МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БЕСКАРКАСНЫХ АРОЧНЫХ
ПОКРЫТИЙ ИЗ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ
С ПОПЕРЕЧНО-ГОФРИРОВАННЫМИ ГРАНЯМИ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кунин Юрий Саулович

Официальные оппоненты: **Белый Григорий Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», профессор кафедры «Строительные конструкции»

Зверев Виталий Валентинович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», заведующий кафедрой «Металлические конструкции»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «17» октября 2017 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие рынка металлических зданий привело к появлению новых типов профилей и конструкций. В последнее время в России широко применяется технология изготовления и монтажа бескаркасных арочных сооружений из тонкостенных холодногнутох профилей с поперечно-гофрированными гранями. Однако, работа конструкции такого типа остается мало изученной. Нормативная база по проектированию рассматриваемых бескаркасных покрытий отсутствует как в России, так и за рубежом. В нормах стран Евросоюза и Северной Америки имеются методики расчета традиционных конструкций из тонкостенных холодногнутох профилей, но на бескаркасные арочные конструкции они не распространяются. В этих методиках расчета рассматриваются конструкции из профилей с плоскими гранями. Вышесказанное не позволяет в полной мере применять зарубежные стандарты для расчета бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутох профилей с поперечно-гофрированными гранями.

Также, для повышения несущей способности бескаркасного арочного покрытия применяют подкрепляющие ребра, которые выполняются из аналогичных, что и основное покрытие, холодногнутох профилей. Подкрепляющие профили закрепляются на нижней поверхности арочного покрытия. Методики расчета рассматриваемых конструкций, в том числе с ребрами жесткости, не разработаны. Несущая способность бескаркасных арочных покрытий с подкрепляющими ребрами не исследована ни экспериментально, ни теоретически, что также ограничивает область их практического применения.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка методики расчета бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутох профилей с поперечно-гофрированными гранями и экспериментальная проверка несущей способности этих конструкций, в том числе выполняемых с подкрепляющими ребрами.

Степень разработанности темы.

Одной из основных причин, ограничивающих широкое применение бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутох профилей с поперечно-гофрированными гранями, является отсутствие государственных нормативных документов по расчету и проектированию, которые учитывали бы особенности их работы. Как известно, при нагружении тонкостенного холодногнутого профиля возможна местная потеря устойчивости в пределах отдельных его граней, которая начинается в упругой стадии работы. Местная потеря устойчивости существенно влияет на распределение напряжений по сечению и, как правило, приводит это распределение к большей неравномерности. На гранях тонкостенных профилей (нижней полки и стенках) рассматриваемых конструкций имеются поперечные гофры, которые также оказывают существенное влияние на их работу.

Известные методики по расчету и проектированию не учитывают ряд важных и определяющих факторов: зависимость параметров поперечного гофрирования от размеров сооружения (пролета и высоты стрелы подъема), переменную высоту гофрирования на стенках профиля, многообразие форм поперечных гофр, наличие элементов жесткости на плоских верхних полках. Это указывает на недостаточную изученность рассматриваемых конструкций. Поэтому оценка несущей способности холодногнутох профилей, с учетом поперечного гофрирования, местной устойчивости и закритического поведения граней, представляется актуальной научной задачей.

Научно-техническая гипотеза: расчетная модель оболочки может рассматриваться как стержневая, с уменьшенными жесткостными характеристиками поперечного сечения холодногнутого профиля, определяемыми с учетом местной потери устойчивости.

Целью диссертационной работы является экспериментально-теоретическое обоснование методики расчета несущей способности бескаркасных

арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутому профилей, учитывающей местную устойчивость и поперечное гофрирование.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1) Исследовать влияние пролета и высоты стрелы подъема бескаркасного арочного покрытия на параметры поперечного гофрирования граней холодногнутого профиля.

2) Исследовать напряженно-деформированное состояние и несущую способность бескаркасного арочного покрытия из стальных тонкостенных холодногнутому профилей с поперечно-гофрированными гранями на основе теоретических методов и численного моделирования.

3) Разработать алгоритмы и программы для автоматизированного моделирования бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутому профилей с поперечно-гофрированными гранями.

4) Разработать методику и провести экспериментальные исследования механических характеристик стали на различных участках поперечного сечения тонкостенного холодногнутого профиля бескаркасного арочного покрытия.

5) Разработать методику и провести экспериментальные исследования натуральных фрагментов бескаркасных арочных покрытий, с учетом действия неравномерной статической нагрузки.

Объектом исследования является бескаркасное арочное покрытие из стальных тонкостенных холодногнутому профилей.

Предметом исследования являются: несущая способность бескаркасного арочного покрытия из стальных тонкостенных холодногнутому профилей с поперечно-гофрированными гранями при действии статических нагрузок; напряженно-деформированное состояние тонкостенных холодногнутому профилей с поперечно-гофрированными гранями; механические характеристики стали тонкостенных холодногнутому профилей.

Научная новизна работы:

1) Установлена зависимость параметров поперечного гофрирования от размеров сооружения: пролета и высоты бескаркасного арочного покрытия.

2) Установлена зависимость параметров упругости поперечно-гофрированных граней от размеров и форм поперечных гофр.

3) Установлена зависимость критических напряжений от параметров упругости и характера нагружения для эквивалентной плоской ортотропной пластинки.

4) Разработана методика экспериментальных исследований работы натуральных фрагментов бескаркасных арочных покрытий, учитывающая неравномерный характер расчетной схемы снеговой нагрузки.

5) Получены результаты экспериментальных исследований натуральных фрагментов бескаркасных арочных покрытий.

6) Определены параметры конечно-элементных моделей для расчета бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутох профилей с поперечно-гофрированными гранями.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- обобщены практические методы расчета холодногнутох профилей с поперечно-гофрированными гранями в бескаркасных арочных покрытиях;

- разработана методика расчета несущей способности бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутох профилей с поперечно-гофрированными гранями;

- разработаны численные модели, которые позволяют исследовать процесс пространственного деформирования, местную и общую устойчивость тонкостенных холодногнутох профилей, а также оценить несущую способность бескаркасного арочного покрытия;

- полученные результаты исследования механических характеристик различных сталей позволят принимать отечественные марки стали с учетом технологии изготовления холодногнутох профилей для бескаркасных арочных покрытий;

- полученные результаты сопоставительного анализа несущей способности бескаркасных арочных покрытий, выполняемых в традиционном (однослойном) варианте и с подкрепляющими ребрами, могут быть использованы для

оптимизации конструкции при проектировании новых зданий, а также при реконструкции существующих объектов.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой для диссертационной работы послужили работы отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области теории расчета стальных строительных конструкций, строительной механики, металловедения, испытаний строительных конструкций, математического моделирования и численных методов расчета. Работа выполнена на основе теоретических и экспериментальных методов исследования. Экспериментальные исследования проводились с использованием как традиционных способов и средств измерения, так и с помощью современных методик и цифрового оборудования. При обработке экспериментальных данных применялись традиционные статистические методы обработки информации с привлечением средств программирования. Численное моделирование проводилось на основе метода конечных элементов.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования, выполнении теоретических исследований, организации, планировании и проведении экспериментальных исследований натурных фрагментов бескаркасных арочных покрытий с последующей обработкой результатов, а также в выполнении экспериментальных исследований механических характеристик сталей холодногнутых профилей. Соискателем самостоятельно разработана методика расчета и выполнено численное моделирование работы бескаркасных покрытий при статических нагрузках, проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.

На защиту выносятся:

1) Результаты исследований напряженно-деформированного состояния и несущей способности тонкостенных холодногнутых профилей с поперечно-гофрированными гранями.

2) Разработанная методика расчета бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей с поперечно-гофрированными гранями.

3) Методика и результаты экспериментальных исследований работы натуральных фрагментов бескаркасных арочных покрытий с подкрепляющими ребрами при статических нагрузках.

4) Методика и результаты исследований механических характеристик различных сталей в тонкостенных холодногнутом профилях для бескаркасных арочных покрытий.

5) Результаты численного моделирования работы бескаркасных арочных покрытий, в том числе выполняемых с подкрепляющими ребрами, при статических нагрузках.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается:

- использованием известных общепринятых расчетных предпосылок строительной механики;

- обоснованностью алгоритмов численных методов расчета, реализованных в верифицированном программном комплексе;

- соответствием результатов расчета, полученным по разработанной методике, экспериментальным данным.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих международных и всероссийских научно-практических конференциях, семинарах и выставках: конференция «Перспективы развития в Республике Беларусь легких стальных тонкостенных конструкций с учетом гармонизации Еврокодов» (Республика Беларусь, г. Минск, 30 марта 2011 г); конференция «Новое в проектировании, изготовлении и монтаже стальных и алюминиевых строительных конструкций», ЦНИИПСК им. Мельникова (Москва, 12 октября 2011 г); конференция «Проектирование стальных строительных конструкций из тонкостенных холодноформованных гнутых профилей», ЦНИИПСК им. Мельникова (Москва, 04 апреля 2012 г); 69-я международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения», СПбГАСУ (Санкт-Петербург, 10 октября 2012); заседание секции «Проектирование строительных металлических конструкций» научно-технического совета ЦНИИПСК им. Мельникова (Москва, 11 апреля 2013 г); конференция к 85-летию НИИЖБ им. А.А. Гвоздева «Прошлое и современное состояние исследований, проектирования

и строительства тонкостенных пространственных конструкций» (Москва, 15 мая 2013 г); научная конференция, посвященной 50 летию кафедры «Испытания сооружений», ФГБОУ ВПО «МГСУ» (Москва, 26 июня 2013 г); международная практическая конференция «Здания и сооружения из ЛМК: конструктивные решения, материалы и технологии» (Р. Беларусь, г. Минск, 22 августа 2013 г); международный конгресс «Гений В.Г. Шухова и современная эпоха», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 17 апреля 2014 г); международная конференция и круглый стол «Инновационные энергосберегающие технологии при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий», СПбГТУРП (Санкт-Петербург, 15 мая 2014 г); II Международная практическая конференция «Здания и сооружения из ЛМК: конструктивные решения, материалы и технологии» (Р. Беларусь, г. Минск, 21 августа 2014 г); 7-я Европейская конференция по стальным и композитным конструкциям Евростил 2014 «Eurosteel 2014: 7th European Conference on Steel and Composite Structures» (Италия, Неаполь, 10-12 сентября, 2014 г).

Внедрение результатов. Разработанная методика расчета использовалась при обследовании в расчетах бескаркасного арочного покрытия физкультурно-оздоровительного комплекса в Кабардино-Балкарской республике, проводимого ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова». Также, предложенная методика расчета и результаты экспериментальных исследований использовались на предприятии ООО «Строительное управление №16» при проектировании многофункциональных секционных бескаркасных ангаров.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 2 статьи в научных журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Объем работы составляет 215 страниц машинописного текста, 105 рисунков и 15 таблиц. Список литературы состоит из 141 наименования, в том числе – 19 на иностранных языках.

Содержание диссертации соответствует пунктам 2, 3 Паспорта специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения.

Работа выполнена в отделе легких стальных тонкостенных конструкций «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и

проектный институт строительных металлоконструкций им. Н.П. Мельникова» и научно-образовательном центре «Испытания сооружений» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» под руководством доцента, кандидата технических наук Ю.С. Кунина.

Автор искренне благодарит руководителя отдела легких стальных тонкостенных конструкций ЦНИИПСК им. Мельникова, старшего научного сотрудника, кандидата технических наук Э.Л. Айрумяна, за всестороннюю поддержку, оказанную при работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

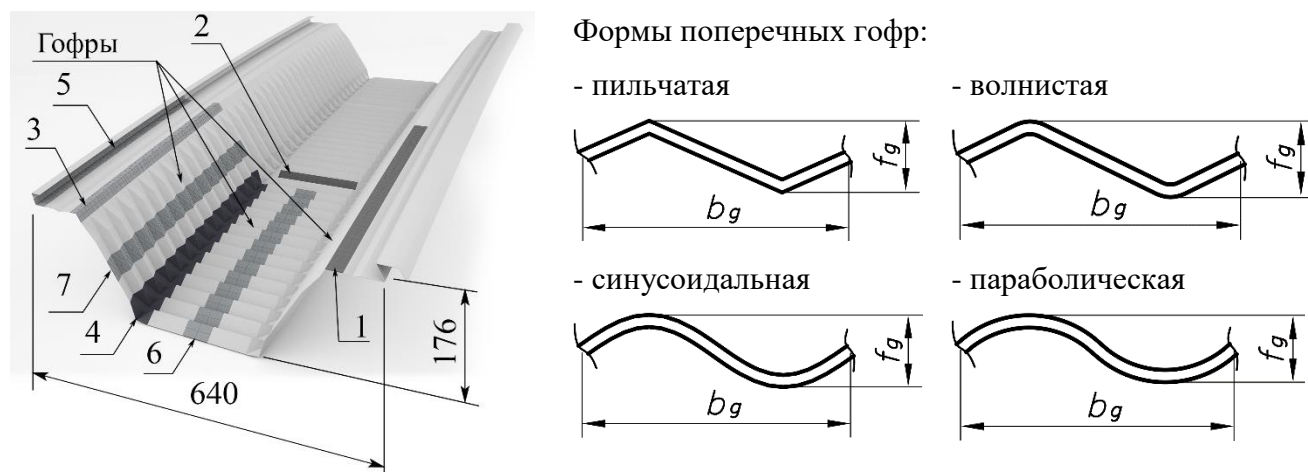
Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, выделены научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена изучению состояния вопроса экспериментальных и теоретических исследований бескаркасных покрытий. Рассматриваются области применения и особенности технологии производства исследуемых бескаркасных покрытий из холодногнутого профиля с поперечно-гофрированными гранями (рисунок 1), которые изготавливаются из рулонной стали толщиной от 0.8 до 1.5 мм.

Изучению влияния холодной гибки на механические характеристики стали в холодногнутом профиле посвящены труды Павлова И.М., Лейченко М.А., Богоявленковского К.Н., Тришевского И.С., Каменщикова Н.И., Козлова А.Г., Немковой И.С., Гладштейна Л.И., Горицкого В.М., Арктикова Г.А., Беляева В.Ф., Шапиро Л.А., Тихенко Ю.Н., Деренковского В.М., Астахова И.В. и многие другие работы. Проведенный обзор позволил выполнить анализ основных факторов влияющих на изменение механических свойств стали при прокатке тонкостенных профилей.

Несущая способность стальных строительных конструкций из тонкостенных профилей исследовалась в работах Власова В.З., Айрумяна Э.Л.,

Белого Г.И., Зверева В.В., Туснина А.Р., Беляева В.Ф., Ведякова И.И., Енджиевского Л.В., Кунина Ю.С. и др., также этот вопрос рассматривали зарубежные исследователи G. Winter,



1-7 – участки отбора образцов металла

Рисунок 1 – Арочный профиль с поперечно-гофрированными гранями

T. Karman, W.Yu, R.A. LaBoube, D. Dubina, R. Landolfo и др. Местная устойчивость граней тонкостенных профилей рассматривается в работах Тимошенко С.П., Вольмира А.С., Лехницкого С.Г., Броуде Б.М., Моисеева В.И., Тамплона Ф.Ф. и др.

Экспериментальным и теоретическим исследованиям бескаркасных арочных покрытий из холодногнутых профилей посвятили свои работы Айрумян Э.Л., Популлова Г.Ю., Марцинкевич Д.В., Кузнецов И.Л., Макеев С.А., Walentynski R. и др.

В ЦНИИСК им Кучеренко в 2004 году Еремеевым П.Г, Арменским М.Ю., Киселевым Д.Б. были проведены экспериментальные исследования действительной работы двухслойных-усиленных бескаркасных арочных покрытий. Такое конструктивное решение, в виде двухслойной оболочки с объединением слоев прямолинейными холодногнутыми профилями, позволило увеличить несущую способность покрытия и величину перекрываемого пролета.

Применяемые в настоящее время нормативные методики расчета, отражают только работу тонкостенных холодногнутых профилей с прямолинейными гранями. Имеющиеся теоретические исследования бескаркасных покрытий не рассматривают трапецеидальный холодногнутый арочный профиль, который

имеет на плоских верхних полках элементы жесткости (продольные рифы) повышающие их местную устойчивость, а, следовательно, и несущую способность. Кроме того, известные решения для определения критических напряжений поперечно-гофрированных пластин применимы только для гофров постоянной высоты по ширине пластины. Это условие для стенок рассматриваемого холодногнутого профиля не применимо, так как они имеют поперечные гофры переменной высоты. Так же не изучено влияние размеров бескаркасного сооружения на параметры поперечного гофрирования граней арочного профиля. Таким образом, обзор отечественных и зарубежных исследований показал, что в настоящее время вопрос расчета и проектирования бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутых профилей с поперечно-гофрированными гранями остается открытым и требует изучения. На основе проведенного анализа современного состояния науки в области исследований работы бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутых профилей с поперечно-гофрированными гранями сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям влияния холодной гибки на механические характеристики стали в холодногнутых профилях для бескаркасных арочных покрытий.

Цели и задачи экспериментальных исследований:

- исследовать влияние холодной гибки, выполняемой по рассматриваемой технологии, на механические характеристики различных сталей;
- определить параметры унифицированной диаграммы деформирования исследуемых сталей и определить для нее аппроксимирующую функцию.

В работе проведены серии статических испытаний на растяжение образцов металла, отобранных из разных участков поперечного сечения профиля. Исследовались четыре марки стали: 02, 08Ю, 08ПС и SS Grade 40, из которых прокатывались холодногнутые профили. Рассматривались следующие толщины: 0.9 мм, 1.0 мм, 1.2 мм и 1.5 мм. Заготовки для изготовления образцов вырезались из различных зон поперечного сечения профиля (рисунок 1).

Анализ результатов экспериментальных исследований механических характеристик различных сталей позволил установить, что распределение зон

упрочнения в поперечном сечении холодногнутого профиля неоднородно (рисунок 2). Наибольшее упрочнение происходит в угловых участках профиля (увеличение σ_T до 27 %). Относительное сужение в угловых зонах профиля и на плоских участках различается незначительно, до 7 %. В результате поперечного гофрирования на диаграммах деформирования отсутствует площадка текучести. Эти участки характеризуются малым относительным удлинением (установлено снижение до 63%). Проведенное исследование позволило определить параметры для унифицированной диаграммы деформирования испытанных сталей, а также рекомендовать выбор марки стали с относительным удлинением не ниже 25 % при проектировании.

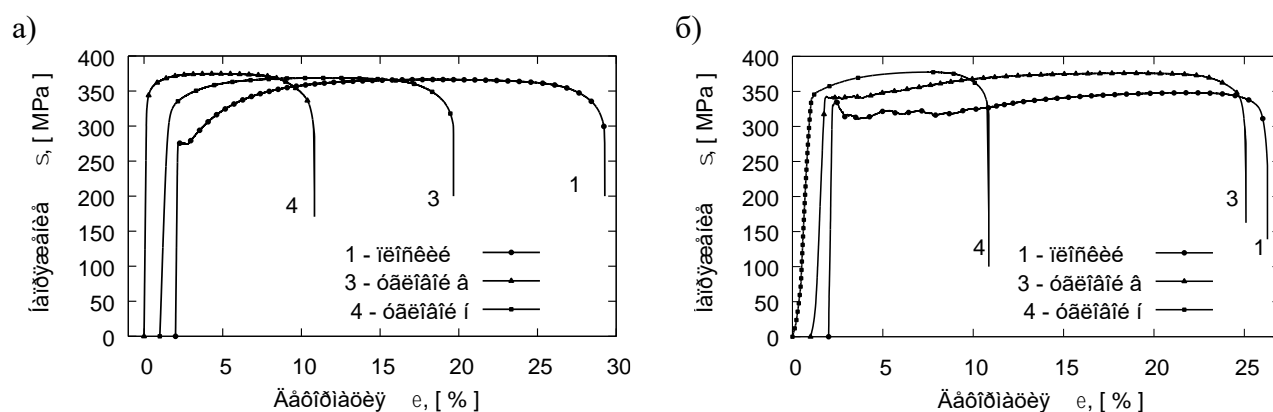


Рисунок 2 – Условные диаграммы деформирования стали: а – 08ПС; б – 08Ю

Третья глава посвящена теоретическим исследованиям и разработке методики расчета бескаркасного арочного покрытия из стальных тонкостенных холодногнутых профилей с поперечно-гофрированными гранями.

Тонкостенные холодногнутые профили трапециевидного сечения для бескаркасных арочных покрытий изготавливаются по специальной технологии, которая при вальцевании арки предусматривает поперечное гофрирование соответствующих граней: нижней широкой полки и двух наклонных стенок (рисунок 1). Гофры имеют ряд параметров: форму, шаг и глубину (высоту). Высота гофр на нижней широкой полке постоянна практически на всей ее ширине и только на участках сопряжения полки со стенками плавно уменьшается до нуля. У стенок профиля высота гофр переменная, начинается от верхних полок и увеличивается к нижней полке. Шаг гофр является постоянным. В зависимости от пролета и радиуса арки изменяется глубина гофрирования. В результате проведенных исследований установлена нелинейная зависимость параметров

поперечных гофр от пролета и высоты арочного покрытия: при увеличении высоты стрелы подъема арки или уменьшении ее радиуса происходит увеличение высоты поперечных гофр. При решении этой задачи расчетная длина развертки гофра определялась по формуле:

$$s_g = \frac{b_g (L_0^2 + 4f_0^2 + 8f_0 h_p)}{L_0^2 + 4f_0^2}, \quad (1)$$

где b_g – шаг гофр; h_p – высота профиля; L_0 – пролет покрытия; f_0 – высота стрелы. По теоретической длине развертки, в зависимости от формы поперечного сечения гофра (см. рисунок 1), находилась высота гофров f_g .

В расчетах на прочность и устойчивость по разработанной методике предложено использовать геометрические характеристики редуцированного поперечного сечения тонкостенного холодногнутого профиля. Для учета потери местной устойчивости применялся метод «редуцирования сечения», основанный на работе сжатых граней профиля в закритической стадии. При этом, каждая грань профиля представлялась как «отдельная» бесконечно-длинная пластинка, работающая в упругой стадии, с шарнирным опиранием по краям, в которой действуют нормальные усилия, распределенные по линейному закону. Для грани профиля без

поперечных гофр критические напряжения могут быть найдены по известной формуле:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2, \quad (2)$$

где k_σ – коэффициент; t , b – толщина и ширина пластинки.

Для оценки влияния поперечных гофр на работу профиля и несущую способность всего сооружения поперечно-гофрированные грани были представлены в виде ортотропных пластинок с параметрами упругости (упругими постоянными: приведенные модули упругости и сдвига, коэффициенты Пуассона), определенными в зависимости от размеров и форм гофр. В работе рассмотрены четыре формы поперечных гофр на гранях профиля (рисунок 1): пильчатая, волнистая, синусоидальная и параболическая. Упругие постоянные ортотропной пластинки, характеризующие волнистую и параболическую формы

поперечных гофр, определялись из условия равенства жесткостей плоской ортотропной пластинки и поперечно-гофрированной грани. Так, приведенный модуль упругости E_I (поперек гофр) может быть найден по формуле:

- для волнистой формы гофров:

$$E_I = \frac{Eb_g t^2}{4b_{g1} \left(t^2 \cos(\alpha) + 4b_{g1}^2 \frac{\tan(\alpha)^2}{\cos(\alpha)} \right) + r_{0g} t^2 (2\alpha + \sin(2\alpha)) + 12r_{0g} \cdot \dots}, \quad (3)$$

$$\dots \left(((2 + \cos(2\alpha))2\alpha - 3 \sin(2\alpha))r_{0g}^2 + 4f_{g1} (\alpha f_{g1} + 2r_{0g} (\sin(\alpha) - \alpha \cos(\alpha))) \right)$$

где α , r_{0g} – угол наклона и радиус сопряжения граней гофра; b_{g1} , f_{g1} – горизонтальная и вертикальная проекции прямого участка грани гофра.

- для параболической формы гофров:

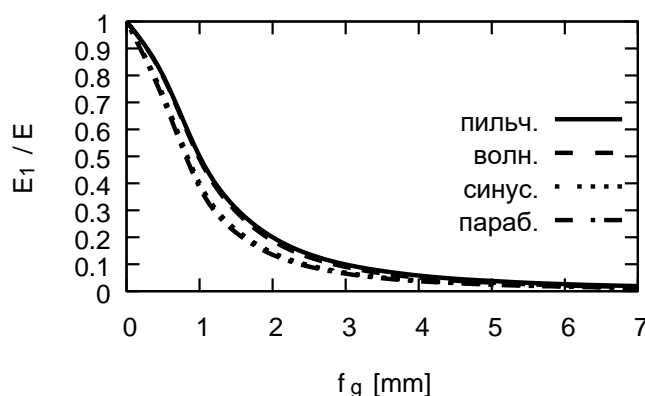
$$E_I = \frac{4096Ef_g^3 t^2}{512b_g f_g^2 t^2 (k_3 - k_2) + f_g k_1 k_5 - 24b_g k_4 (k_2 - k_3)}, \quad (4)$$

где $k_1 = \sqrt{\frac{16f_g^2}{b_g^2} + 1}$, $k_2 = \ln \left(k_1 - 4 \frac{f_g}{b_g} \right)$, $k_3 = \ln \left(k_1 + 4 \frac{f_g}{b_g} \right)$,

$$k_4 = \frac{b_g^4}{64} + b_g^2 f_g^2 + 32f_g^4, \quad k_5 = 2048f_g^4 - 160b_g^2 f_g^2 - 3b_g^4.$$

Поперечное гофрирование нижней полки и стенок профиля приводит к существенному изменению их жесткостных свойств. На рисунке 3 приведены графики изменения приведенного модуля упругости E_I в зависимости от высоты и формы гофр, для удобства значения E_I отнесены к модулю упругости стали E .

а)



б)

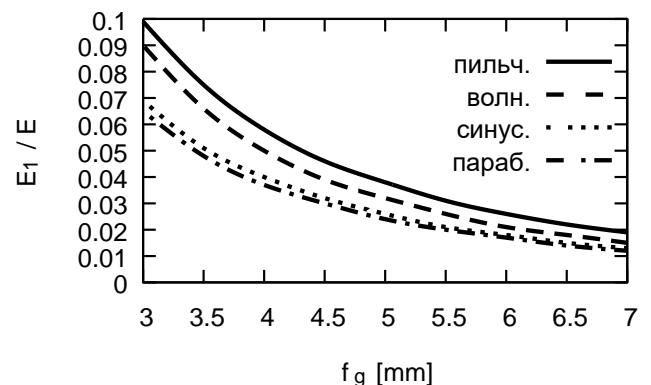


Рисунок 3 – Изменение приведенного модуля упругости E_I : а – для $0 \leq f_g \leq 7$; б – для $3 \leq f_g \leq 7$

По полученным значениям упругих постоянных рассчитывались соответствующие цилиндрические жесткости для определения критических напряжений. Для нижней полки профиля, критические напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_{cr} = \frac{2\pi^2 \sqrt{D_1 D_2}}{b^2 t} \left[1 + \frac{D_3}{\sqrt{D_1 D_2}} \right], \quad (5)$$

где D_1, D_2 – цилиндрические жесткости; D_3 – приведенная жесткость.

Эффективная ширина грани профиля после потери устойчивости определяется по формуле:

$$b_{ef} = b \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{R_y} (1 - 0.22) \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{R_y}}}. \quad (6)$$

Решение задачи по определению критических напряжений в стенках холодногнутого профиля выполнялось численным методом – МКЭ, с учетом конструктивных особенностей стенки, имеющей плоские и гофрированные участки с переменной высотой гофров. Рассматривалась прямоугольная ортотропная пластинка с различным соотношением сторон, нагруженная нормальными усилиями, распределенными по линейному закону. По результатам расчета построены графики зависимости $k_\sigma(\psi)$, где ψ – отношение минимального усилия нагружения пластинки к максимальному. Соответственно, критические напряжения для поперечно-гофрированных стенок профиля можно определить по формуле (2) с определением коэффициента k_σ по графикам (см. рисунок 4).

Таким образом, несущая способность бескаркасного покрытия может быть определена при выполнении расчетов на прочность и устойчивость с использованием геометрических характеристик редуцированного поперечного сечения профиля (рисунок 5). Расчет арочного профиля следует выполнять, как сжато-изгибаемого элемента с учетом дополнительного момента, вызванного смещением (e_{N_x}) центральной оси при расчете редукиции сечения в условиях центрального сжатия.

На основе проведенных теоретических исследований можно заключить:

- с увеличением высоты поперечных гофр f_g , снижается продольная жесткость граней профиля. При одинаковом значении f_g наименьший приведенный модуль E_I наблюдается у гофра параболической формы, наибольший – у гофра пильчатой формы соответственно, расхождение может достигать 62 %;

- выявлено, что для стенок арочного профиля, вследствие неравномерного снижения продольной жесткости из-за переменной высоты поперечных гофров, характер работы и значения критических напряжений потери устойчивости в упругой стадии отличаются от аналогичных показателей для полки с постоянной высотой гофров.

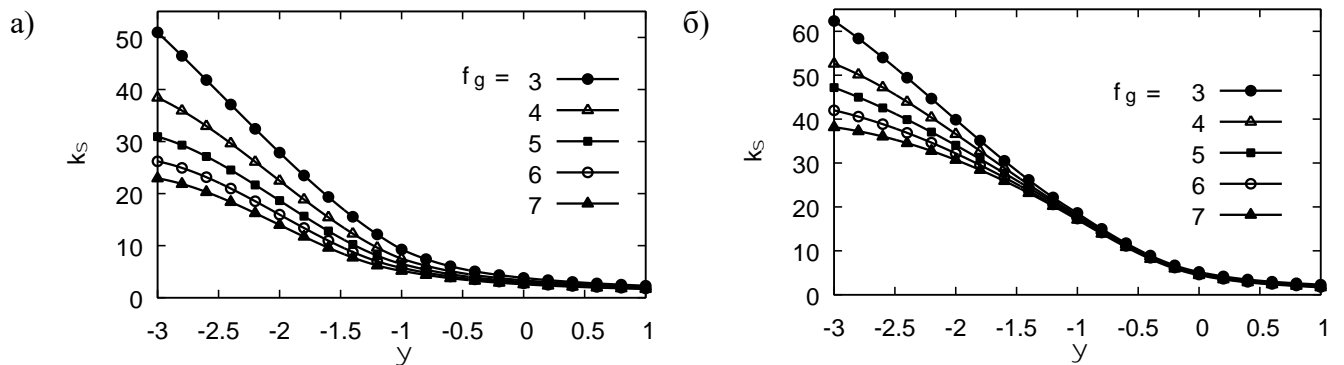


Рисунок 4 – Коэффициент k_σ для диапазона высоты гофр f_g от 3 до 7 мм ($b_g = 45$ мм):
а – сжатие в зоне гофров; б – сжатие в зоне плоского участка

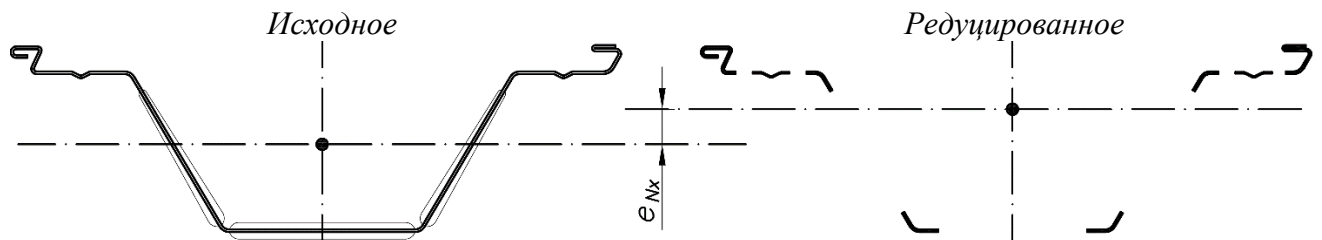


Рисунок 5 – Поперечное сечение профиля

В четвертой главе приведены методика и результаты экспериментальных исследований, которые были проведены на двух фрагментах бескаркасного покрытия, изготовленных в натуральную величину, с пролетами 23.2 и 18 м (рисунок б, а).

Цели и задачи экспериментальных исследований:

- определить несущую способность и деформативность бескаркасных покрытий при действии статической вертикальной нагрузки;

- выявить особенности действительной работы натуральных образцов бескаркасного покрытия при различных схемах нагружения;
- выявить характер разрушения натуральных фрагментов покрытия.

Испытания натуральных образцов (см. таблицу 1) проводились при двух схемах приложения нагрузки: сосредоточенной в центре арки и неравномерно распределенной на одной из половин пролета, имитирующей снеговую нагрузку (рисунок 6, б). Нагружение образцов осуществлялось с помощью гидравлического домкрата и специальной оснастки. Образцы в ходе испытаний доводились до разрушения.

Методика испытаний предусматривала кривую давления, имитирующую неравномерное распределение снега. Такое давление создавалось при помощи переменного (расчетного) расстояния между точками приложения нагрузки (рисунок 6, б):

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \frac{2 \cdot S_1 \cdot (5 \cdot R^2 - 4 \cdot S_1^2)}{5 \cdot (3 \cdot R^2 - 2 \cdot S_1^2)} \\
 X_2 &= \frac{10 \cdot R^2 \cdot S_2^3 - 10 \cdot R^2 \cdot S_1^3 + 8 \cdot S_1^5 - 8 \cdot S_2^5}{5 \cdot (S_1^2 - S_2^2) \cdot (2 \cdot S_1^2 - 3 \cdot R^2 + 2 \cdot S_2^2)} \\
 &\dots \\
 X_n &= \frac{10 \cdot R^2 \cdot S_n^3 - 10 \cdot R^2 \cdot S_{n-1}^3 + 8 \cdot S_{n-1}^5 - 8 \cdot S_n^5}{5 \cdot (S_{n-1}^2 - S_n^2) \cdot (2 \cdot S_{n-1}^2 - 3 \cdot R^2 + 2 \cdot S_n^2)},
 \end{aligned} \tag{7}$$

где $S_1 \dots S_n$ – границы участков эпюры снеговой нагрузки; R – радиус арки.

Таблица 1 – Параметры экспериментальных образцов

| Образец | Толщина стали t, мм | Пролет L_0 , м | Стрела арки f_0 , м | Ширина B, м | Радиус арки R, м |
|---------|------------------------|---------------------|--------------------------|----------------|---------------------|
| Первый | 1.2 | 23.2 | 7.9 | 2.6 | 12.5 |
| Второй | 0.9 | 18.0 | 9.0 | 3.8 | 9.0 |

а)

б)

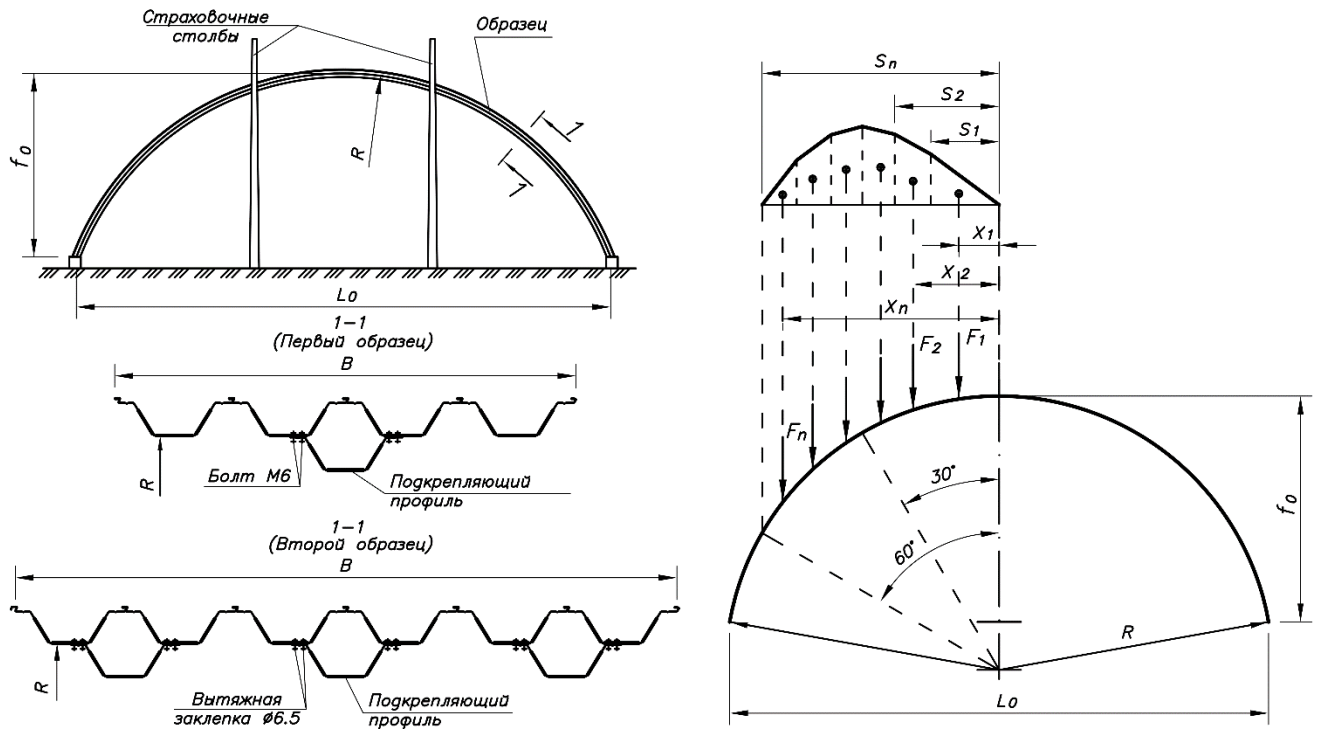


Рисунок 6 – Экспериментальные образцы и схема нагружения

В ходе испытаний регистрировались прикладываемая к образцу нагрузка и перемещения отдельных точек (маркеров). При определении перемещений использовались традиционные прогибомеры, а также метод тахеометрической съемки.

На основании проведенных экспериментальных исследований работы двух натуральных фрагментов бескаркасного арочного покрытия, при двух схемах приложения нагрузки, установлено, что наличие поперечного гофрирования на соответствующих гранях тонкостенного холодногнутого профиля приводит к повышенной деформативности всей конструкции; начальные несовершенства формы оболочки покрытия определяют характер ее деформирования; при достижении критических нагрузок на покрытии, холодногнутые арочные профили трапецевидного сечения могут терять форму начального поперечного сечения; при нагружении сосредоточенной нагрузкой (рисунки 7, 8) деформирование образца происходило несимметрично относительно центра, что связано с начальными несовершенствами формы образца и разностью высотных отметок опор; при одностороннем приложении неравномерной нагрузки отмечалась геометрически

нелинейная работа конструкции (рисунки 7, 8); первый образец пролетом 23.2 м, по характеру деформирования при двух схемах нагружения, можно отнести к арке, с опиранием близким к шарнирному или к упруго защемленному; предельная нагрузка, характеризующая потерю несущей способности образца пролетом 23.2 м, составила 1.31 кПа, что соответствует II снеговому району; второй образец пролетом 18 м, по характеру деформирования при двух схемах нагружения, можно рассматривать как бесшарнирную арку; предельная нагрузка, характеризующая потерю несущей способности образца пролетом 18 м, составила 1.28 кПа, что также соответствует II снеговому району. Фотографии экспериментальных образцов после испытаний приведены на рисунке 9.

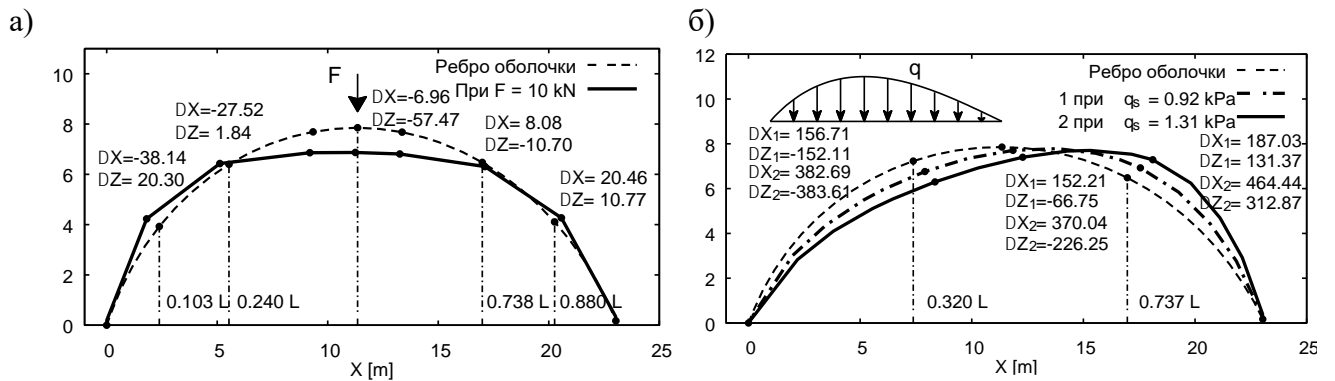


Рисунок 7 – Деформированные схемы образца пролетом 23.2 м

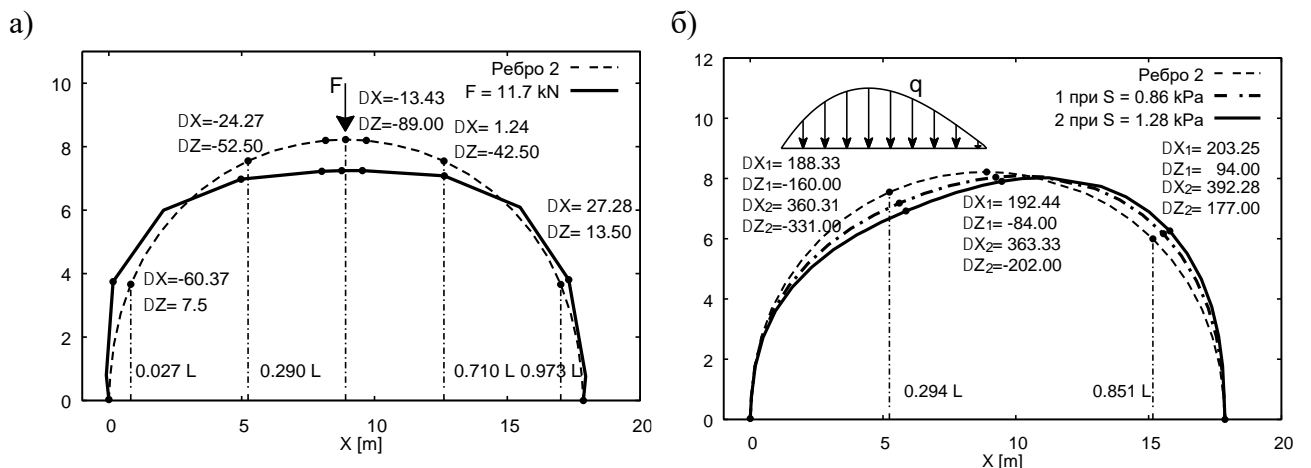


Рисунок 8 – Деформированные схемы образца пролетом 18 м

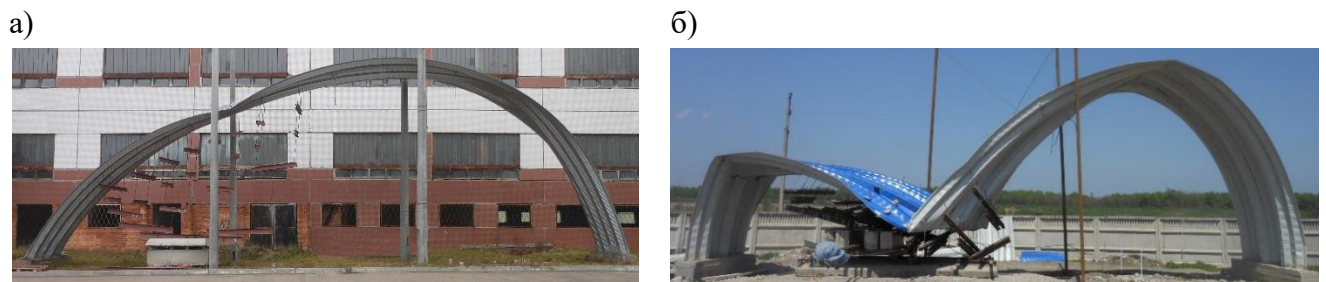


Рисунок 9 – Экспериментальные образцы после испытаний: а – пролет 23.2 м; б – пролет 18 м

В пятой главе проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния и несущей способности бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей с поперечно-гофрированными гранями. Выполнено сравнение полученных результатов расчета различных численных моделей с результатами расчета по разработанной методике и с экспериментальными данными.

Численное моделирование проводилось в ПК ANSYS Mechanical с использованием разработанных программ-макросов, написанных на языке APDL. Расчеты выполнялись в линейной и не линейной постановках (геометрическая и физическая нелинейность). Расчеты с учетом нелинейных свойств материала выполнялись с использованием диаграммы деформирования стали, представленной в виде кусочно-линейной функции. Для моделирования тонкостенных профилей использовались пространственные оболочечные конечные элементы.

Для внецентренно сжатого криволинейного профиля с поперечно-гофрированными гранями разработана численная модель, с помощью которой были определены необходимые параметры, использованные при расчете бескаркасного покрытия. Сравнение результатов расчета с известными результатами эксперимента показало приемлемую для инженерных расчетов точность. Расчетное значение предельной нагрузки отличалось от ее экспериментального значения не более, чем на 3%. Проведенные расчеты с разным подходом в моделировании холодногнутого профиля (рисунок 10) показали, что у КЭ модели с гофрированными гранями присутствует выраженная неравномерность в распределении напряжений, наибольшие напряжения отмечаются в нижних углах профиля, тогда как в КЭ модели с плоскими гранями распределение напряжений более однородно и в работе участвуют большие участки нижней полки по сравнению с гофрированной моделью.

В результате серии проведенных расчетов арочных покрытий с различными граничными условиями на опорах и вариантами моделирования профиля установлено влияние поперечного гофрирования на работу бескаркасного

покрытия. Расчет без учета поперечных гофр на гранях профиля может привести к существенному завышению несущей способности конструкции. В рассматриваемых задачах предельная нагрузка при учете гофрирования максимально снижалась в 1.8 раза. Также наблюдалось увеличение перемещений узлов сетки модели с поперечными гофрами. В целом вертикальные перемещения могут увеличиваться до 3 раз, горизонтальные до 2 раз. Проведенное сравнение показало, что отличие значения предельной нагрузки, определенной по инженерной методике и по результатам расчета оболочечной модели с гофрированием, не превысило: для традиционной однослойной оболочки – 4 %, для оболочки с подкрепляющими ребрами – 10 %.

Проведенное численное моделирование работы двух образцов, пролетом 23.2 и 18 м, позволило сравнить расчетные и экспериментальные значения предельных нагрузок для этих конструкций. Отличие расчетного значения максимальной нагрузки от экспериментального для первого образца ($L = 23.2$ м) составило 3.8 %, для второго образца ($L = 18$ м) – 1.5 %. Расчетные и экспериментальные значения перемещений двух образцов покрытий при различных граничных условиях на опорах приведены на рисунке 11.

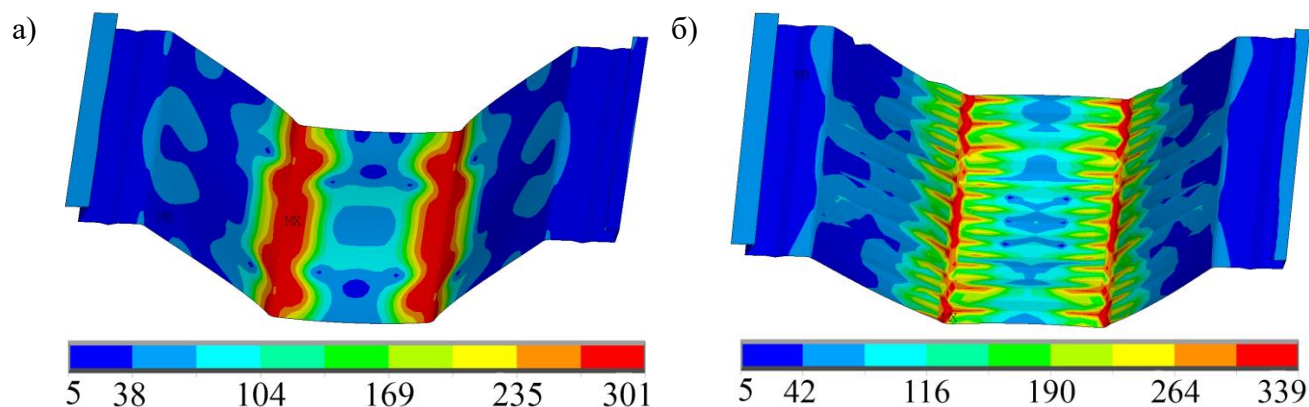


Рисунок 10 – Напряженно-деформированное состояние фрагмента КЭ модели при внецентренном сжатии [МПа]: а – с плоскими гранями; б – с гофрированными гранями

а)

б)

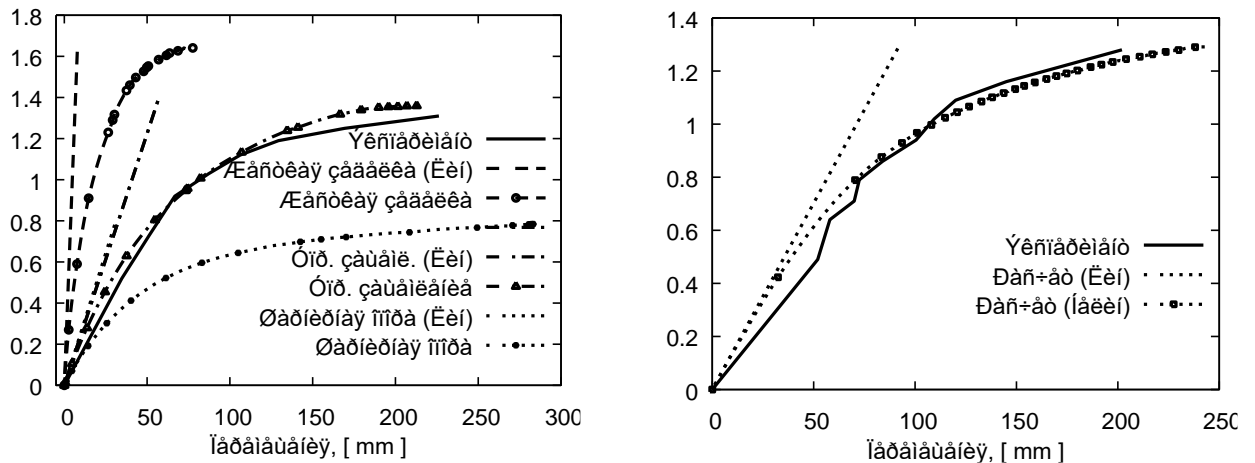


Рисунок 11 – Вертикальные перемещения центра арки бескаркасного покрытия с подкрепляющими ребрами: а – пролет 23.2 м; б – пролет 18 м

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Проведенный анализ методик расчета конструкций из стальных холодногнутох профилей показал, что действующие нормативные документы не отражают особенности работы, рассматриваемых бескаркасных покрытий, что связано с отсутствием методов расчета профилей с поперечно-гофрированными гранями.

2) Установлено влияние основных размеров сооружения на параметры поперечного гофрирования граней холодногнутого профиля. При увеличении высоты стрелы подъема арки или уменьшении ее радиуса происходит нелинейное увеличение высоты поперечных гофр. Проведено сравнение влияния форм гофр на продольную жесткость граней. Установлено, что наибольшую жесткость обеспечивают пильчатая и волнистая формы.

3) Установлено, что в профилях с поперечно-гофрированными гранями напряжения распределяются неравномерно. Наибольшие напряжения отмечаются в углах профиля, из-за потери устойчивости и низкой продольной жесткости гофрированных стенок и полки. Нормальные напряжения в угловых зонах могут превышать более чем в 8 раз напряжения в среднем участке по ширине грани.

4) Разработана методика расчета геометрических характеристик поперечного сечения холодногнутого профиля на основе проведенных теоретических исследований местной устойчивости и существующих методов редуцирования, в которой поперечно-гофрированные грани рассматриваются как

плоские ортотропные пластинки, а негофрированные – как изотропные. Установлена зависимость критических напряжений от параметров поперечного гофрирования граней профиля, что позволяет рассчитывать геометрические характеристики редуцированного сечения с учетом местной устойчивости граней профиля имеющих постоянную и переменную высоту гофр.

5) Разработана методика расчета бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутых профилей с поперечно-гофрированными гранями. Сравнение результатов расчетов по разработанной методике с результатами эксперимента и численного моделирования показало расхождение по предельной нагрузке не более 10%.

6) Разработаны численные модели, позволяющие проводить расчёты и определять несущую способность бескаркасного арочного покрытия из стальных тонкостенных холодногнутых профилей с поперечно-гофрированными гранями, выполняемого как в традиционном варианте, так и с подкрепляющими ребрами. Подобраны параметры разработанных КЭ моделей и проведены серии расчетов, которые получили экспериментальное подтверждение.

7) Установлено, что бескаркасное арочное покрытие с подкрепляющими ребрами обладает большей несущей способностью чем традиционное без ребер. Так, при жесткой заделке на опорах, увеличение несущей способности ребристого покрытия достигает 70 %. При этом увеличивается жесткость покрытия и снижается его удельная металлоемкость до 15%.

8) Проведены экспериментальные исследования механических характеристик сталей: 08ПС, 08Ю, 02, SS Grade 40, на различных участках поперечного сечения холодногнутого профиля. Установлено, что при прокатке арочного профиля относительное удлинение материала в угловых зонах может снижаться до 2.7 раза. Рекомендуется выбирать марку стали с относительным удлинением не ниже 25 %.

Определены параметры унифицированной диаграммы деформирования исследованных сталей. Разработан алгоритм построения кривой деформирования в виде кусочно-линейной функции для численных методов расчета.

9) Проведены натурные экспериментальные исследования образцов покрытия. Экспериментально установлены следующие особенности работы

бескаркасной арочной конструкции при нагружении несимметричной неравномерной нагрузкой на половине пролета:

- при одностороннем приложении неравномерной нагрузки отмечается геометрически нелинейная работа конструкции;
- при достижении предельной нагрузки на покрытии холодногнутые профили трапециевидного сечения могут терять начальную форму поперечного сечения.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность предложенной в работе методики расчета.

Рекомендациями и перспективами дальнейшей разработки темы могут являться:

- Исследование влияния торцевых стен на несущую способность и деформативность бескаркасного сооружения.
- Разработка методики расчета, учитывающей изменение жесткостных характеристик профиля по длине арки при нелинейном расчете.
- Разработка и исследование новых конструктивных решений, позволяющих увеличить несущую способность бескаркасного арочного покрытия.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Липленко, М.А.** Особенности работы бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей / М.А. Липленко, Э.Л. Айрумян // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – №6. – С. 42-44.

2. **Липленко, М.А.** Метод нагружения арочной конструкции при испытаниях / М.А. Липленко // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – №3. – С. 57-60.

Публикации в других изданиях:

3. **Липленко, М.А.** Механические характеристики стали тонкостенных холодногнутых профилей бескаркасных зданий / М. А. Липленко, Ю. С. Кунин // «Заводская лаборатория. Диагностика материалов». – 2016. – № 4. – Том 82. – С. 47-52.

4. Айрумян, Э.Л. Эффективные стальные конструкции из холодногнутого оцинкованных профилей – перспективное направление развития металлостроительства в России / Э.Л. Айрумян, Н.И. Каменщиков, **М.А. Липленко** // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения». – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2012. – С. 48-52.

5. Айрумян, Э.Л. Перспективы ЛСТК в России / Э.Л. Айрумян, Н.И. Каменщиков, **М.А. Липленко** // СтройПРОФИ. – 2013. – № 10. – С. 12-17.

6. **Липленко, М.А.** Технология строительства бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутого профилей / М.А. Липленко // Материалы II международной практической конференции «Здания и сооружения из ЛМК». – Минск: Отраслевые форумы, 2014. – С. 41-44.

7. **Liplenko, M.A.** Load-carrying capacity of frameless arched roofs structures with cold-formed profiles / M.A. Liplenko, E.L. Ayrumyan // Proceedings of Eurosteel 2014: 7th European Conference on Steel and Composite Structures. – pp. 451-452.

Липленко Максим Александрович

Несущая способность бескаркасных арочных покрытий
из стальных холодногнутых профилей
с поперечно-гофрированными гранями

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук