

На правах рукописи

КРЕТИНИН Андрей Николаевич

**ТОНКОСТЕННЫЕ БАЛКИ ИЗ ГНУТЫХ
ОЦИНКОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ: СОСТАВНЫХ
ПОЯСОВ КОРОбЧАТОГО СЕЧЕНИЯ И
ГОФРИРОВАННЫХ СТЕНОК**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2008

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном
учреждении высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный архитектурно-
строительный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Крылов Иосиф Иосифович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Казарновский Вадим Соломонович

доктор технических наук, профессор
Сильченко Петр Никифорович

Ведущая организация: ООО Научно-исследовательское
проектно-строительное предприятие
РЕКОН

Защита состоится « 18 » ноября 2008 г. в « 14⁰⁰ » часов на засе-
дании диссертационного совета ДМ 212.099.08 при федеральном
государственном образовательном учреждении высшего профессио-
нального образования «Сибирский федеральный университет» по
адресу:

660049, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, ИГУРЭ СФУ,
аудитория К – 120.

Тел. (8-3912) 52-78-68, факс (8-3912) 52-78-68,

E-mail: end-lev@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
градостроительства, управления и региональной экономики Сибир-
ского федерального университета

Автореферат разослан « » октября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Е.В. Пересыпкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Высокая конкуренция на строительном рынке требует эффективных конструктивных решений строительных конструкций.

Металлические конструкции, в частности, легкие несущие стальные конструкции пролетами до 24 м, пользуются повышенным спросом в связи с развитием в нашей стране производственных предприятий, сельского хозяйства и других отраслей. Возрастает потребность в складских помещениях, торговых, спортивных зданиях. Одним из направлений повышения эффективности металлических конструкций зданий для таких отраслей является применение оцинкованных холодногнутых профилей толщиной до 3 мм. Зарубежный и отечественный опыт применения конструкций на их основе выявил в них ряд преимуществ перед традиционными конструкциями из прокатных профилей: низкий расход металла, высокая коррозионная стойкость, возможность изготовления на строительной площадке, что в итоге позволяет снизить стоимость конструкций «в деле».

Идея объединения в одну несущую конструкцию таких распространенных оцинкованных холодногнутых профилей, как С-образные профили и профилированный лист, потенциально, позволит снизить затраты на материалы, изготовление, транспортировку и монтаж. Действительные технико-экономические характеристики таких конструкций будут выявлены после их разработки, исследования и апробации.

Цель работы – разработка и экспериментально-теоретическое исследование новой конструктивной формы стальных тонкостенных балок, состоящих из С-образных холодногнутых оцинкованных профилей в составе поясов и гофрированных стенок из оцинкованного профилированного листа.

На защиту выносятся:

1. Конструктивное решение тонкостенных балок из холодногнутых оцинкованных профилей: составных поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок;
2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния стальных балок, состоящих из С-образных холодногнутых оцинкованных

профилей в составе поясов и гофрированных стенок из оцинкованного профилированного листа;

3. Результаты испытаний на сдвиг соединений оцинкованных элементов толщиной 0,7-2 мм на самонарезающих винтах диаметрами 5,5 и 6,3 мм, болтах М8, М10, М12 нормальной точности и на высокопрочных с предварительным натяжением;

4. Инженерная методика расчета и рекомендации по применению тонкостенных балок из холодногнутых оцинкованных профилей: составных поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок.

Научная новизна работы:

1. Новая конструктивная форма – тонкостенные балки из гнутых оцинкованных элементов: С-образных профилей в составе поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок из профилированного листа с несущими соединениями на преднатяженных болтах;

2. Результаты экспериментальных и теоретических исследований напряженно-деформированного состояния тонкостенных балок из гнутых оцинкованных профилей: С-образных профилей и профилированного листа. Особенности напряженно-деформированного состояния таких конструкций.

3. Особенности работы на сдвиг соединений оцинкованных элементов толщиной 0,7-2 мм на самонарезающих винтах диаметрами 5,5 и 6,3 мм, болтах нормальной точности и на высокопрочных болтах с предварительным натяжением М8, М10, М12, результаты их сравнительного анализа.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным использованием основных положений теории тонкостенных стержней и пластин, сопоставительным анализом результатов теоретических исследований с результатами экспериментов.

Личный вклад автора. Автору принадлежат постановка задачи, изготовление экспериментальных балок и соединений, разработка методики и проведение экспериментальных исследований, фактическая расстановка измерительных приборов, разработка методики и проведение численных исследований балок, обработка результатов и формулировка основных положений, определяющих научную новизну.

Практическая значимость работы. Результаты и рекомендации выполненной работы позволяют проектировать эффективные конструкции покрытий зданий различных отраслей народного хозяйства, могут быть использованы для дальнейшего совершенствования конструктивных форм и методик расчета металлических конструкций.

Результаты исследований используются в спецкурсах по кафедре металлических и деревянных конструкций НГАСУ (Сибстрин) для студентов старших курсов и аспирантов, а также при переподготовке инженеров-строителей на факультете повышения квалификации. Получено два патента РФ на полезную модель. По результатам диссертационной работы выполнено внедрение Новосибирским ЗАО Научно-технический центр "ЭР-КОНСиб".

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на научно-практических конференциях Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Новосибирск, 2004-2008 гг), на региональной научно-технической конференции Красноярского государственного архитектурно-строительного университета (Красноярск, 2006 г), на международных научно-практических конференциях в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете (Санкт Петербург, 2007 г), в Ростовском государственном архитектурно-строительном университете (Ростов-на-Дону, 2007 г), в Сибирском государственном университете путей сообщения (Новосибирск, 2007 г). В полном объеме диссертационная работа докладывалась на расширенном научном семинаре кафедры металлических и деревянных конструкций Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (г. Новосибирск, 2008 г), на расширенном заседании кафедры строительных конструкций СФУ (г. Красноярск, 2008 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемом журнале из перечня ВАК и описания двух патентов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных выводов, библио-

графического списка (119 источников) и 5 приложений общим объемом 140 страниц, в том числе 76 рисунка, 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель, задачи, раскрыта научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведена информация об апробации результатов исследования.

В первой главе рассмотрены основополагающие принципы создания легких металлических конструкций, дан обзор теоретических и экспериментальных исследований стальных тонкостенных балок, отмечены их достоинства и недостатки; рассмотрены основные виды гнутых профилей и их особенности; сформулированы цель и задачи диссертации.

Характерной чертой легких стальных конструкций является использование эффективных конструктивных форм, оптимальных соотношений генеральных размеров, усовершенствованных материалов и технологий, позволяющих улучшить технико-экономические показатели конструкций. Основные показатели легких стальных конструкций:

1. Наименьший среди строительных конструкций расход металла, эффективное использование сталей повышенной прочности;

2. Низкая трудоёмкость изготовления за счет высокой технологичности, типизации и унификации; возможности изготовления на поточных линиях;

3. Экономия затрат на транспортировку, что обеспечивается не только облегчением конструкций, но и их компактностью;

4. Монтаж в короткие сроки с минимальной трудоёмкостью;

5. Долговечность за счет применения прогрессивных методов антикоррозионной защиты, конструктивных форм, не допускающих появления очагов коррозии;

6. Надёжность конструкций в результате применения многосвязных систем, конструктивных решений с улучшенной хладостойкостью, в частности за счет оптимизации соединений

элементов; ясная схема работы, позволяющая выполнить корректный расчет конструкций.

Если под тонкостенными понимать балки, гибкость стенки которых более 200, то под такое определение попадают следующие наиболее эффективные типы стальных балок: балки с гибкой стенкой, балки с гофрированной стенкой, балки-фермы, балки с перфорированной стенкой, балки коробчатого сечения. Общие принципы совершенствования тонкостенных балок – это концентрация металла в поясах и максимальное уменьшение толщины стенки, за счет чего достигается минимизация расхода металла.

В балках с гибкой стенкой (гибкостью свыше 400) допускается потеря местной устойчивости стенки с образованием так называемых «хлопунов». Как показывают исследования И.И. Ааре, Н.П. Мельникова, В.В. Бирюлева и И.К. Погадаева, масса таких балок за счет использования закритической стадии работы стенки на 25-40% меньше обычных. Ограничением распространения таких конструкций, в основном, явились психологические аспекты их эксплуатации.

Теория расчета балок с гофрированной стенкой разрабатывалась в Казахском отделении ЦНИИПСК Остриковым Г.М., Максимовым Ю.С., где они получили достаточно широкое применение. Проводимые, наряду с теоретическими, экспериментальные исследования показали, что гофрированные стенки хорошо сопротивляются действию поперечных сил, не теряя местной устойчивости. Установлено, при изгибе балки нормальные напряжения в стенке у поясов быстро падают и их практически можно не учитывать в расчетах, считая, что изгибающие моменты воспринимаются только поясами. Балки с гофрированной стенкой эффективны, однако требуют применения специального листогибочного и сварочного оборудования.

Раскосные балки-фермы, состоящие из поясов и наклонных ребер из спаренных уголков, а также гибкой стенки (Кулиш В.И., Томилов С.Н. – Дальневосточный ун-т) представляют определенный интерес и дают возможность получить эффективные по расходу металла конструкции. Однако, с учетом значительной протяженности сварных швов, такие системы не дают значительного снижения стоимости конструкций «в деле».

Балки с перфорированной стенкой, получаемые, как правило, путем фигурного раскроя существующих прокатных профилей и дальнейшей стыковкой с целью увеличения их габаритной высоты, получили достаточно широкое распространение. Недостатки таких балок, связанные со сложностью восприятия локальных нагрузок, наличия концентраторов напряжений, значительными затратами на изготовление, компенсируются доступностью исходных материалов и снижением стоимости «в деле» до 20% по сравнению с прокатными балками.

Преимущества балок коробчатого сечения заключаются в высокой крутильной жесткости, низком расходе металла, что позволяет применять их при наличии крутящих моментов, изгибе в двух плоскостях, при отсутствии системы связей. В обычных условиях такие балки применяют редко ввиду сложности их изготовления.

Составными элементами разрабатываемых балок являются холодногнутые профили, изготавливаемые из листа толщиной 0,7...2 мм, сечения которых показаны на рис. 1.

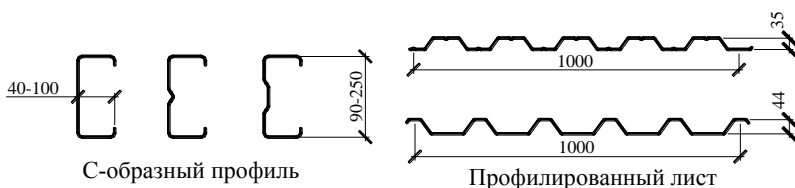


Рис. 1. Холодногнутые профили – составные элементы балок

Процесс профилирования заключается в последовательном изменении формы поперечного сечения исходной заготовки при прохождении её через ряд вращающихся горизонтальных и вертикальных валков (роликов) профилегибочного стана.

Изучению действительной работы холодногнутых профилей посвящены работы многих российских и зарубежных исследователей. В частности, К.Н. Богоявленским, Б.В. Гольцевым (Ленинградский политехн. ин-т), Я.А. Березинским (Киевский строит. ин-т), А.Г. Козловым (Красноярский ПромстройНИИ-Проект), И.С.Тришевским, В.В. Клепандой (УкрНИИмет), G. Winter (США) и др. рассматривалось влияние наклепа, который образуется при изготовлении профилей, на их напряженно-

деформированное состояние. Проблемами несущей способности различных холодногнутых профилей занимались: Э.Л. Айрумян, В.Ф. Беляев, О.Б. Баборыкина, О.К. Быкова, А.Л. Васильева, D.Yang, N. Baldassino, B.W. Schafer, Y.B. Kwon, G. J. Hancock и др.

Весь комплекс проблем, связанных с развитием данного направления, выходит за рамки одной кандидатской диссертации. Первоочередные *задачи диссертационной работы* следующие:

1. Выполнить поиск наиболее эффективного конструктивного решения балок, состоящих из холодногнутых оцинкованных С-образных профилей в составе поясов и гофрированных стенок в виде оцинкованного профилированного листа, выявить особенности напряженно-деформированного состояния таких балок;

2. Исследовать возможные конструктивные решения и типы соединений гнутых оцинкованных элементов толщиной до 2 мм, выполнить их сравнительный анализ с целью применения в разрабатываемых балках;

3. Выполнить экспериментальное исследование балки покрытия, состоящей из гнутых оцинкованных элементов: С-образных профилей в составе поясов коробчатого сечения и гофрированной стенки из профилированного листа, выявить особенности её работы и критерии перехода в предельное состояние. Произвести сопоставление теоретических данных с результатами эксперимента;

4. Выполнить оптимизацию разрабатываемых балок, предоставить рекомендации по их проектированию, изготовлению и монтажу.

Во второй главе представлены результаты поисковых экспериментальных исследований конструктивных решений тонкостенных балок с поясами из гнутых С-образных профилей и стенки из профилированного листа.

Выделены две принципиальные конструктивные формы таких балок – одностенчатая (рис. 2, а) и двустенчатая (рис. 2, б). Идея объединения в одну конструкцию С-образных профилей и профилированного листа защищена патентами РФ №№ 40758, 55394.

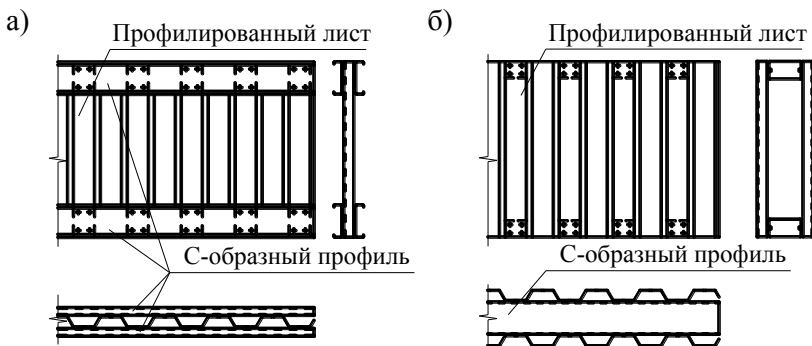


Рис. 2. Конструктивные решения балок

Для определения наиболее эффективного конструктивного решения была выполнена серия испытаний крупномасштабных моделей балок. Испытано четыре балки пролетом 3,2 м, который был ограничен габаритами стенда. Высота всех балок принята равной 400 мм ($h/L=1/8$), в качестве поясов использовались С-образные профили высотой 90 мм и толщиной 2 мм по ТУ1120.100.4751.5705-00, в качестве стенки использовался профилированный лист НС35-1000-0,6 по ГОСТ 24045-94, ориентированный перпендикулярно поясам. Соединение поясов со стенкой осуществлялось с помощью самонарезающих винтов $d=4,8$ мм и болтов М6.

Оценивались качественные показатели, такие как работоспособность, картина распределения напряжений в элементах, относительные общие и локальные деформации, а также закономерности перехода в предельное состояние и "слабые" места конструкции. В процессе сборки определялись и технологические качества конструкций.

Испытательная установка состояла из силовой рамы, в которой благодаря системе траверс нагрузка от гидравлического домкрата распределялась на четыре сосредоточенные силы. Раскрепление балок для предотвращения общей потери устойчивости обеспечивалось направляющими, расположенными через $1/3$ пролета.

При испытании одностенчатой (рис. 2, а) балки Б1, выполненной с использованием только самонарезающих винтов, на

первых же этапах загрузки потеряли несущую способность соединения на самонарезающих винтах в приопорной зоне, в которых винты устанавливались со стороны более толстого элемента (участок 2а...2б на графике работы балки – рис. 4), что привело к потере местной устойчивости стенки балки (рис. 3, а). Дальнейшее нагружение балки происходило в условиях увеличения зоны смятия металла в соединениях и закритической работы стенки.

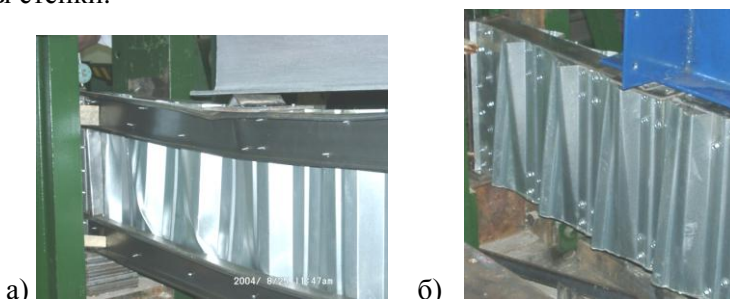


Рис. 3. Потеря местной устойчивости стенки балок Б1 (а) и Б3 (б)

В опорных зонах балки Б2, в отличие от балки Б1, установлено по два профилированных листа стенки, вложенных друг в друга, для их крепления к поясам вместо самонарезающих винтов применялись болты М6. Внесенные изменения позволили значительно увеличить несущую способность балки. Исчерпание несущей способности произошло после потери местной устойчивости сжатого пояса под одной из распределительных пластин. Недостаток подобного конструктивного решения – высокая трудоемкость изготовления.

Балка Б3 отличалась от балок Б1 и Б2 более технологичной двустенчатой компоновкой с поясами коробчатого сечения. Стенки крепились к поясам при помощи самонарезающих винтов. В результате испытания балки Б3 было выявлено, что стенки балки в такой компоновке практически не участвуют в работе на восприятие поперечной силы (рис. 3, б), что можно объяснить недостаточной жесткостью стоек-гофров такой системы, принцип работы которой аналогичен балке Веренделя.

Поиск решения проблемы чрезмерной деформативности стенки привел к идее установки в балке нисходящих раскосов из

тонкого листа. Такое конструктивное решение было запатентовано.

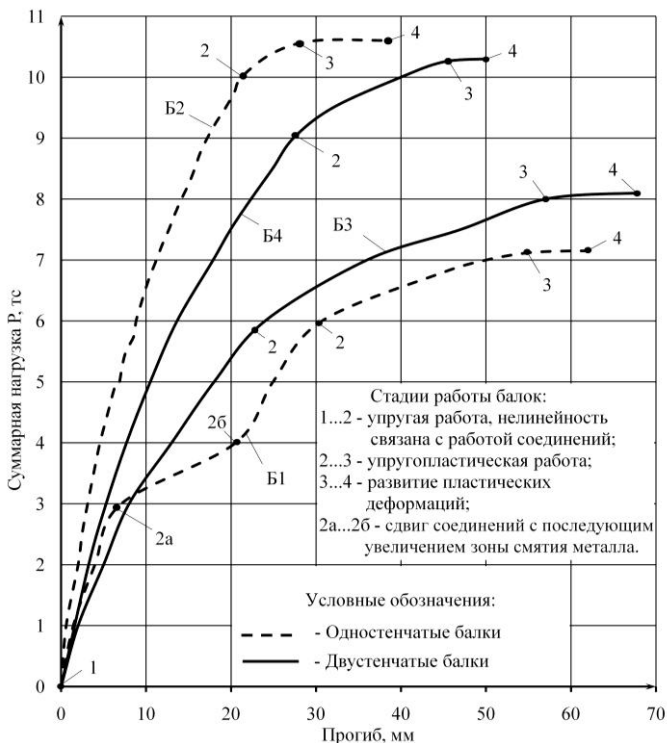


Рис. 4. Графики работы балок Б1...Б4

В опорных частях балки Б4, в отличие от балки Б3, были установлены раскосы из листа -2x150 мм. В результате испытания была отмечена значительно меньшая деформативность, чем у балки Б3 (рис. 4). Полное исчерпание несущей способности балки произошло в результате потери местной устойчивости верхнего пояса при уровне напряжений, соответствующих пределу текучести стали поясов.

Сравнительная характеристика этапов работы балок Б1...Б4 приведена рис. 4. Оптимальные технологические качества и приемлемая несущая способность были выявлены у балок с двустенчатой компоновкой. Для повышения эффективности таких балок необходимо провести выбор оптимального типа соедине-

ний оцинкованных тонколистовых элементов и конструктивными мерами улучшить работу стенки на восприятие поперечной силы.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований соединений тонколистовых оцинкованных элементов на самонарезающих винтах, болтах нормальной точности и на высокопрочных болтах с предварительным натяжением.

Основной целью исследований было выявление наиболее эффективного типа соединений по критериям несущей способности и стоимости.

Сварные соединения являются наиболее широко применяемым в строительстве типом соединений. Однако использование сварки при изготовлении металлических конструкций из оцинкованных профилей толщиной менее 3 мм неприемлемо по разным причинам, в том числе из-за разрушающего действия сварочной дуги на цинковое покрытие.

Соединения на самонарезающих винтах обладают многими достоинствами, такими как легкость и быстрота установки, низкая стоимость, доступность. Однако им свойственна деформативность, относительно малая несущая способность, чувствительность к переменным нагрузкам, вибрациям, локальное разрушение цинкового покрытия, что негативно сказывается на долговечности и надежности конструкции.

Болтовые соединения на болтах нормальной точности в оцинкованных конструкциях из холодногнутых профилей применяются редко, так как с позиции увеличения несущей способности соединения необходимо увеличивать диаметр болтов, что приводит к ослаблению поперечного сечения соединяемых элементов.

Применение другого типа болтовых соединений – фрикционных (сдвигоустойчивых) соединений на высокопрочных болтах с предварительным натяжением – в мировой практике распространено только для элементов толщиной более 10-12 мм на болтах диаметром более 16 мм. Применение такого типа соединений для оцинкованных элементов толщиной менее 3 мм ранее не изучено.

Выполнены экспериментальные исследования работы соединений следующих типов:

- а) на самонарезающих винтах диаметром 5,5 и 6,3 мм;
- б) на болтах М8, М10, М12 нормальной точности (работающие в соединении на смятие тонколистовых элементов);
- в) на болтах М8, М10, М12 класса прочности 8.8 с предварительным натяжением.

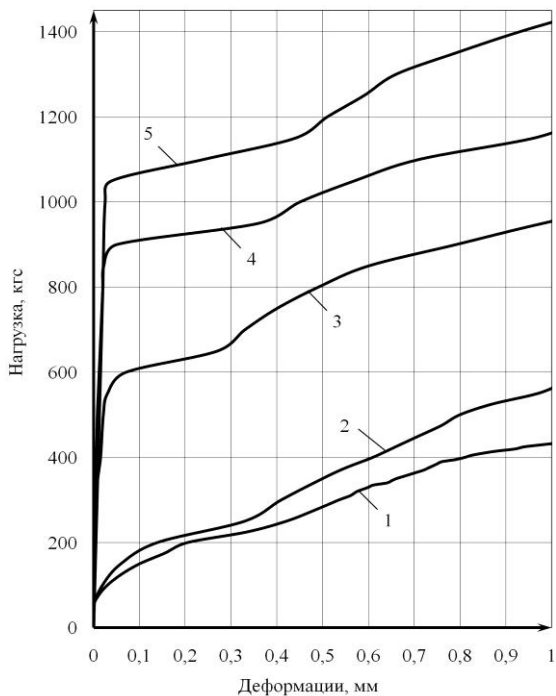


Рис. 5. Графики работы соединений, выполненных с помощью: 1 – самонарезающего винта $d=6,3$ мм; 2 – болта М8 без предварительного натяжения; 3, 4, 5 – соответственно болтами М8, М10, М12 класса прочности 8.8 с предварительным натяжением

Модели соединений представляли собой две пластины с комбинациями толщин 0,7, 0,8, 1,5 и 2 мм из стали С245. Испытаниями стандартных образцов определены фактические характеристики стали. Среднее значение предела текучести составило

$\sigma_T = 2900$ кгс/см², временного сопротивления $\sigma_B = 3950$ кгс/см², относительного удлинения $\varepsilon = 23,5\%$.

Натяжение болтов во фрикционных соединениях производилось динамометрическим ключом. Для определения коэффициента закручивания был разработан специальный динамометрический прибор.

Основные стадии работы соединений и принципиальные отличия можно проследить на графиках (рис. 5), где приведены данные о работе соединений различного типа для двух оцинкованных листов толщиной 1,5 мм.

В результате испытаний выявлено, что соединения тонколистовых элементов на преднапряженных высокопрочных болтах обладают в 9-10 раз более высокой несущей способностью по сравнению с аналогичными соединениями, работающими на смятие металла. Возможностью установки меньшего количества соединений достигается снижение приведенной стоимости на балку до 3 раз. Как показывает мировой и российский опыт применения фрикционных соединений, они обладают высокой надежностью и долговечностью. Поэтому для дальнейшего применения в качестве несущих соединений разрабатываемых балок рекомендуются соединения на преднапряженных высокопрочных болтах.

В четвертой главе представлены результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния тонкостенных балок из гнутых оцинкованных профилей. Численные исследования проводились с использованием метода конечного элемента.

Выполнено компьютерное моделирование работы экспериментальных балок Б1...Б4 для выработки методики расчета и создания адекватных расчетных схем. Задача решалась при помощи программы Cosmos. Расчет производился с учетом физической и геометрической нелинейности. Балки моделировались с помощью треугольных плоских и криволинейных конечных элементов оболочечного типа. Размеры оболочек варьировались от 5 мм у граней стенок и полок профилей до 35 мм в остальных зонах. В результате сопоставления данных с результатами экс-

перимента сходимость данных по напряжениям составила 4-6%, по деформациям менее 15%.

Далее проанализировано НДС двустенчатых балок без установки наклонных раскосов. Выявлено, что при сдвиге стенок на величину $b/2$ (рис. 6) обеспечивается исключение локального изгиба поясов и включение стенки на восприятие поперечной силы, что приводит к повышению несущей способности балки.

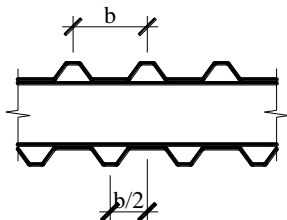


Рис. 6. Схема сдвига стенок

Установлено, что в балках со смещением стенок полки гофров профилированного листа, прикрепленные к поясам, находятся в условиях чистого сдвига. В таких отсеках стенок возможна потеря местной устойчивости с образованием диагональных складок.

Оценку местной устойчивости стенки предлагается определять с помощью зависимости Тимошенко С.П. и Броуде Б.М., скорректированной с учетом фактических граничных условий и соотношений размеров пластинок:

$$\tau_{cr} = k_1 \left(1,02 + \frac{0,76}{\mu^2} \right) \left(\frac{100t}{a} \right)^2 \quad (1)$$

где $k_1 = 1,1$ – найденный в результате численного анализа поправочный коэффициент;

a – меньшая из сторон пластинки (ширина полки гофра стенки, прикрепленного к поясам);

t – толщина стенки;

$\mu = h/a$, где h – высота сечения балки.

На основании проведенных исследований к дальнейшему использованию рекомендуются балки с двустенчатой компоновкой сечения, гофры профилированного листа которой смещены вдоль продольной оси балки, как показано на рис. 6.

В пятой главе представлены методика и результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния и особенностей работы балки пролетом 9 м.

нагрузки. Устойчивость положения системы обеспечивалась рамами из деревянных брусков, установленных с шагом 1,3 м вдоль балки. Деревянные рамы не препятствовали вертикальным перемещениям балки в процессе испытания.

Измерительная система включала в себя прогибомеры, тензометрический комплекс; деформации гофров профилированного листа определялись с помощью индикаторов часового типа.

Предельное состояние балки наступило в результате вязкого разрушения нижнего пояса.

Анализируя графики прогибов балки (рис. 8), можно выделить несколько стадий её работы.

Этап I. При загрузке балки равномерно распределенной нагрузкой, приложенной к половине пролета, до уровня 650 кгс/м, зависимость общих деформаций от нагрузки линейная. Максимальные относительные деформации составили $f/L \approx 1/690$. После разгрузки остаточные деформации не превышали уровня $f/L \approx 1/3000$ (в пределах погрешности измерений), что говорит об упругой работе балки.

Этап II. При загрузке балки нагрузкой, равномерно распределенной на весь пролет балки, отмечаются следующие стадии работы:

1. Стадия упругой работы балки, в которой можно выделить два участка:

1.1. Участок линейной зависимости между нагрузкой и деформациями ($P - f$) до уровня нагрузки $P \approx 600$ кгс/м ($f/L \approx 1/370$);

1.2. Участок нелинейной зависимости $P - f$ от $P \approx 600$ кгс/м ($f/L \approx 1/370$) до $P \approx 920$ кгс/м ($f/L \approx 1/150$), на протяжении которого наблюдались деформации полок профнастила стенок балки в сечениях с нераскрепленными гофрами в стыках листов профнастила;

2. Стадия упругопластической работы, от $P \approx 920$ кгс/м ($f/L \approx 1/150$) до $P \approx 1030$ кгс/м ($f/L \approx 1/56$), характеризующийся развитием пластических деформаций в нижнем поясе и интенсивным ростом прогибов;

3. Стадия пластической работы балки при нагрузке $P \approx 1030$ кгс/м, с развитием прогибов до $f/L \approx 1/40$, до полного исчерпания несущей способности.

Предельное состояние второй группы, соответствующее развитию прогибов до предельного нормативного значения, наступило при нагрузке $P \approx 810$ кгс/м ($f/L \approx 1/225$).

Сходимость теоретических данных с результатами эксперимента не превысила 7%. Теоретическое значение несущей способности для стадии упругой работы, вычисленное с использованием приближенных формул, составило $P^{\text{теор}} = 910$ кгс/м (расхождение с экспериментальными данными 1,1%), прогиб балки при этой нагрузке составил 32 мм, что значительно меньше реального прогиба балки.

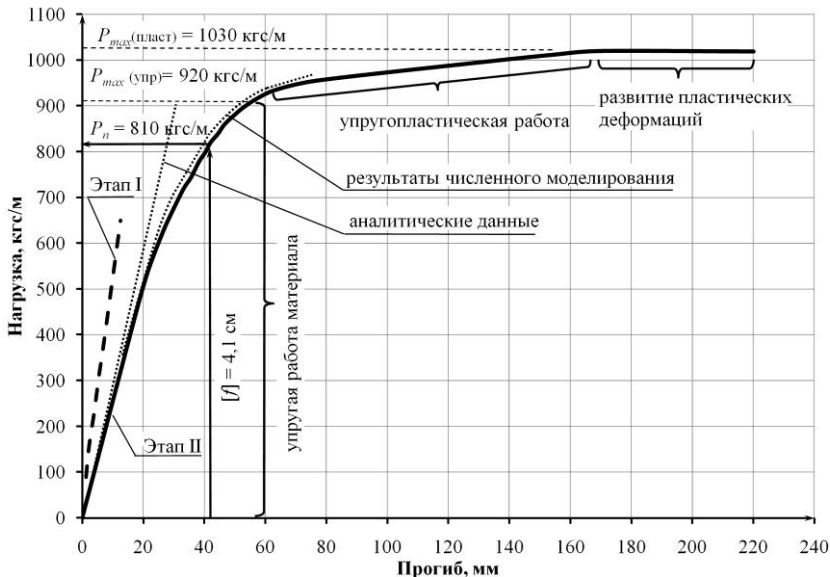


Рис. 8. Графики прогибов экспериментальной балки

После численного моделирования работы балки с учетом реального закрепления профилей стенки, получен график прогибов балки, имеющий расхождение с экспериментальными данными менее 4%. Таким образом, эксперимент подтвердил достоверность основных расчетных предпосылок и теоретических данных, позволяя использовать их при дальнейшей разработке таких конструкций.

В шестой главе проанализированы вопросы оптимизации разрабатываемых балок. Рассмотрены балки пролетом от 6 до 15 м с варьируемыми соотношениями высоты сечения к перекрываемому пролету $h/L = 1/5 \dots 1/16$ под погонную нагрузку $(q+g) = 400 \dots 1200$ кгс/м. Установлено, что минимизация стоимости материалов достигается при $h/L=1/8$.

Область применения разработанных балок – стропильные конструкции покрытий зданий с легкой кровлей для I-IV снеговых районов, отапливаемых и неотапливаемых, без подвешенного транспорта, для неагрессивных и слабоагрессивных сред, со степенью огнестойкости IV.

В качестве поясов балок рекомендуется использовать С-образный профиль по ТУ1120.100.4751.5705-00 из оцинкованного листа толщиной 1,5-2 мм. Высота профиля, в первом приближении, принимается равной $h/8$. Момент инерции сечения вычисляется без учета стенки. Условие прочности поясов балки:

$$\sigma_{\max} = yM/J_x \leq R_y \gamma_c, \quad (2)$$

где M – расчетный изгибающий момент;
 J_x – момент инерции сечения;
 y – расстояние от оси $x-x$ до фибровых точек сечения;
 R_y – расчетное сопротивление стали профилей поясов;
 γ_c – коэффициент условий работы, принимаемый равным 0,95.

Максимальные сжимающие напряжения не должны превышать критических напряжений для стенки профиля пояса.

В качестве стенки рекомендуется использовать профилированный лист С44-1000-0,7(0,8) по ГОСТ 24045-94. Прочность стенки на срез проверяется по формуле:

$$\tau = Q/ht \leq R_s \gamma_c, \quad (3)$$

где Q – расчетная поперечная сила в рассматриваемом сечении;

h – высота сечения балки;

t – толщина стенки;

R_s – расчетное сопротивление профилированного листа срезу.

Из условия местной устойчивости действующие касательные напряжения не должны превышать критических напряжений, вычисляемых по формуле (1).

Прогиб балки определяется с учетом изгибных и сдвиговых деформаций:

$$f = k_2 k_3 q^n l^4 / EJ_x, \quad (4)$$

где q^n – нормативная нагрузка на балку;
 l – пролет;
 E – модуль упругости стали;
 k_2 – коэффициент, учитывающие влияние поперечной силы; $k_2=1,25$; k_3 – коэффициент, учитывающий статическую схему балки.

В качестве соединений стыков поясов и стенок с поясами рекомендуется применять болты М10, М12 класса прочности 8.8 по ГОСТ 7798-70 с предварительным натяжением. Стыки листов стенки объединяются комбинированными заклепками диаметром 4,8 мм по ГОСТ 26805-86 с шагом 150 мм.

Некоторые типовые конструктивные решения балок при беспрогонной компоновке приведены в таблице:

Пролет, м	Шаг, м	Суммарная расчетная нагрузка, кгс/м ²				
		100	150	200	250	300
6	2	-	-	П1.1; С1	П1.1; С1	П1.2; С1
	3	-	П1.1; С1	П1.2; С1	П1.2; С1	П2.1; С1
	4	П1.1; С1	П1.2; С1	П1.2; С1	П2.1; С1	П2.2; С2
9	2	-	П1.2; С1	П2.1; С1	П2.1; С2	П2.2; С2
	3	П1.2; С1	П2.1; С1	П2.2; С2	П2.2; С2	П2.2; С2
	4	П2.1; С1	П2.1; С1	П2.2; С2	П2.2; С2	П2.2; С2
12	2	-	П2.1; С1	П2.1; С1	П2.2; С2	П2.2; С2
	3	П2.1; С1	П2.1; С1	П2.2; С2	П2.2; С2	П2.2; С2
	4	П2.1; С1	П2.2; С2	П2.2; С2	П2.2; С2	-
15	2	П2.1; С1	П2.2; С2	П2.2; С2	П3.1; С2	П3.2; С2
	3	П2.2; С2	П2.2; С2	П3.2; С2	П3.2; С2	-
	4	П2.2; С2	П3.1; С2	П3.2; С2	-	-

Условные обозначения:

С-образные профили поясов по ТУ 1121-001-94685174-2006:

П1.1 – С100х50х15х1,5; П1.2 – С100х50х15х2;

П2.1 – С150х50х15х1,5; П2.2 – С150х50х15х2;

П3.1 – С200х50х15х1,5; П3.2 – С200х50х15х2.

Профилированный лист по ГОСТ 24045-94:

C1 – C44-1000-0,7; C2 – C44-1000-0,8; цифра 2 перед обозначением означает, что от опор до 1/3 пролета балки листы двойные, вложены друг в друга.

Проанализированы возможные технологии изготовления: с применением стационарного оборудования в условиях цеха, с применением только ручного инструмента в условиях строительной площадки, а также комбинированной (наиболее эффективной) технологии, при которой составные элементы балок подготавливаются в условиях цеха с последующими минимальными операциями по сборке в условиях стройплощадки.

Выполнен анализ экономической эффективности. Разработанные балки с учетом применения комбинированной технологии изготовления позволяют снизить затраты «в деле» до 25-30% по сравнению с фермами типа «Молодечно».

Осуществлено опытное внедрение конструкций: в г. Новосибирске в 2005 г. построен склад пролетом 12 м, выполнен рабочий проект животноводческого комплекса в Новосибирской области.

Основные результаты и выводы:

1. Доказана возможность создания тонкостенных балок из гнутых оцинкованных элементов, включающих С-образные профили в составе поясов и гофрированные стенки из профилированного листа с соединениями на болтах и самонарезающих винтах. По результатам исследования получено два патента РФ.

2. Установлено, что наибольшая эффективность балок из холодногогнутого оцинкованного профиля достигается при двустенчатой компоновке сечения с поясами коробчатого сечения из С-образных профилей.

3. Выявлено, что соединения оцинкованных тонколистовых элементов на болтах и самонарезающих винтах, работающих на смятие тонкого металла, малоэффективны из-за их низкой несущей способности. Альтернативой являются фрикционные соединения на высокопрочных болтах с предварительным натяжением, обладающие в 9-10 раз большей несущей способностью.

4. Установлены и подтверждены результатами экспериментальных исследований параметры численного моделирования

работы балок. В результате испытания балки пролетом 9 м отмечено расхождение напряжений, полученных теоретически и экспериментально, в 7%, деформаций в 4%, что подтверждает корректность принятых расчетных схем по методу конечного элемента.

5. Установлено, что балки из холодногнутых оцинкованных профилей целесообразно применять в качестве стропильных конструкций покрытий различных зданий пролетом до 15 м для I-IV снеговых районов с шагом балок 2 – 4 м. Оптимальной компоновкой покрытия является беспрогонная, при которой по балкам укладывается стальной оцинкованный профилированный настил.

6. Применение в качестве строительных конструкций балок из холодногнутых оцинкованных профилей по сравнению с наиболее эффективными аналогами из металлопроката позволяет снизить расход металла на 25-30%, снизить стоимость с учетом затрат на изготовление, транспортировку и монтаж на 20-25% при применении в качестве несущих конструкций покрытий зданий.

Основные результаты диссертации представлены в следующих материалах:

1. Кретинин А.Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей / И.И. Крылов, А.Н. Кретинин // Тезисы докладов 62-й научно-практической конференции НГАСУ (Сибстрин) – Новосибирск: НГАСУ, 2005. – С. 23.

2. Кретинин А.Н. Эффективные балки из тонкостенных профилей / И.И. Крылов, А.Н. Кретинин // Известия вузов. Строительство. – 2005. – №6. – С. 11-14.

3. Кретинин А.Н. Конструкции из тонкостенных оцинкованных профилей / И.И. Крылов, А.Н. Кретинин // Материалы научно-практической конференции "Исследования, расчёт, проектирование и безопасная эксплуатация строительных конструкций зданий и сооружений". – Челябинск: Южно-Уральский гос. университет, 2005. – С. 2-3.

4. Кретинин А.Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей / И.И. Крылов, А.Н. Кретинин // Тезисы док-

ладов 63-й научно-практической конференции НГАСУ (Сибстрин) – Новосибирск: НГАСУ, 2006. – С. 15.

5. Кретинин А.Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей / И.И. Крылов, А.Н. Кретинин // Сборник материалов 24-й региональной Научно-практической конференции. – Красноярск: Красноярский гос. строит. ун-т, 2006. – С. 53-54.

6. Кретинин А.Н. Развитие конструктивной формы балочных систем из тонкостенных оцинкованных профилей / И.И. Крылов, А.Н. Кретинин // Известия вузов. Строительство. – 2007. – №2. – С. 88-92.

7. Кретинин А.Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей / А.Н. Кретинин // Материалы международной научно-практической конференции "Строительство - 2007". – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2007. – С. 43-45.

8. Кретинин А.Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей / А.Н. Кретинин // Материалы международной научно-практической конференции "Наука и инновации в современном строительстве - 2007". СПб, Санкт-Петерб. гос. строит. ун-т, 2007. – С. 123-126.

9. Кретинин А.Н. Опыт проектирования строительных конструкций из тонкостенных стальных профилей / И.И. Крылов, А.Н. Кретинин // Материалы международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе". – Новосибирск: СГУПС, 2007. – С. 267-268.

10. Кретинин А.Н. Особенности работы тонкостенной балки из гнутых оцинкованных профилей / А.Н. Кретинин, И.И. Крылов // Известия вузов. Строительство. – 2008, – №6. – С. 4-11.

11. Патент 40758 Россия. Конструкция из гнутых оцинкованных профилей / И.И. Крылов, А.Н. Кретинин (Россия). Оpubл. 27.09.2004 Бюл. №27.

12. Патент 55394 Россия. Раскосная балочная система из гнутых оцинкованных профилей / И.И. Крылов, А.Н. Кретинин (Россия). Оpubл. 10.08.2006 Бюл. №22.