

На правах рукописи



**Коротких Александр Васильевич**

**ФЕРМЫ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ОЦИНКОВАННЫХ  
ПРОФИЛЕЙ С ПЕРЕКРЕСТНОЙ РЕШЕТКОЙ НА  
СДВИГОУСТОЙЧИВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ**

05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск 2012

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

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, профессор  
**Крылов Иосиф Иосифович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Зверев Виталий Валентинович**

доктор технических наук, профессор  
**Сабуров Валерий Федорович**

**Ведущая организация:** **НИПСФ "УНИКОН", г. Кемерово**

Защита диссертации состоится « 24 » февраля 2012 г. в 13.30 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.08 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 82, кабинет К120.

Тел. 8 (391) 206-27-59, факс 8 (391) 206-27-59, E-mail: [end-lev@yandex.ru](mailto:end-lev@yandex.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » января 2012г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Е.В. Пересыпкин

## Общая характеристика работы

Актуальность темы. Основные цели совершенствования несущих стальных конструкций - снижение их массы, уменьшение трудоемкости изготовления и монтажа, а также повышение их долговечности. Одним из вариантов достижения указанных целей может служить применение в несущих стальных конструкциях зданий и сооружений тонкостенных оцинкованных профилей (ТОП) взамен горячекатаных. ТОП получают путем холодного гнутья стальных оцинкованных листов толщиной от 0,7 до 3,0 мм. Наиболее распространенные в строительной практике профили толщиной от 0,7 до 0,9 мм (ограждающие конструкции) и от 1,5 до 3,0 мм (несущие конструкции). К положительным особенностям ТОП относятся низкий расход металла по сравнению с конструкциями из прокатных профилей и повышенная коррозионная стойкость благодаря цинковому покрытию.

Недостатками ТОП можно считать затруднение применения электро- и газосварки вследствие неизбежного разрушения защитного цинкового покрытия; необходимость выполнения соединений элементов несущих конструкций с использованием значительного количества крепежных элементов (болты, самонарезающие винты или вытяжные заклепки).

Область применения ТОП – ограждающие и несущие конструкции зданий гражданского и производственного назначения с пролетами преимущественно до 18 м. Тонкостенные оцинкованные профили в несущих конструкциях зданий и сооружений позволяют достичь существенного экономического эффекта по сравнению с традиционно используемыми стальными конструкциями на основе горячекатаных профилей.

На сегодняшний день большинство несущих конструкций, проектируемых на основе ТОП, обладают весьма ограниченным шагом стропильных систем, составляющим от 1,0 до 3,0 м в зависимости от пролета и климатического района строительства. Такой малый шаг обусловлен, главным образом, необходимостью снижения усилий в элементах стержневых несущих систем с целью возможности их восприятия тем количеством крепежных элементов, которые можно расположить в соединении. Это означает, что несущая способность узловых соединений конструкций из ТОП ограничивает шаг и пролет элементов каркаса здания. Следовательно, для повышения эффективности применения ТОП в несущих элементах каркаса здания желательно разработать и исследовать новые конструктивные формы узловых соединений ТОП, обладающие большей несущей способностью в сравнении с традиционно используемыми. Один из возможных путей увеличения их несущей способности - применение в

узлах сдвигоустойчивых болтовых соединений. В них основным критерием несущей способности является не прочность соединяемых тонкостенных элементов на смятие кромок отверстий, а преодоление сил трения по соприкасающимся поверхностям.

Цель работы - разработка эффективного конструктивного решения ферм на основе холодногнутых тонкостенных оцинкованных профилей со сдвигоустойчивыми узловыми соединениями, обеспечивающего низкую металлоемкость, компактность при транспортировке в отдаленные и труднодоступные районы и быстровозводимость в условиях строительной площадки.

Задачи работы:

1) теоретически и экспериментально исследовать работу одно- и многоболтовых сдвигоустойчивых соединений ТОП;

2) экспериментально уточнить значение коэффициента трения соприкасающихся поверхностей ТОП в составе сдвигоустойчивого соединения;

3) разработать рекомендации по расчету и конструированию одно- и многоболтовых сдвигоустойчивых соединений ТОП;

4) разработать эффективное конструктивное решение ферм из ТОП на сдвигоустойчивых соединениях;

5) экспериментально и теоретически изучить работу предлагаемой конструкции ферм из ТОП;

6) провести оптимизацию основных параметров исследуемой конструкции ферм;

7) разработать инженерную методику расчета и конструирования исследуемой конструкции ферм из ТОП;

8) оценить технико-экономическую целесообразность применения разработанной конструкции ферм в покрытиях зданий.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- получено значение коэффициента трения соприкасающихся поверхностей ТОП в составе сдвигоустойчивого соединения;

- экспериментально и теоретически установлено напряженное состояние и особенности работы сдвигоустойчивых соединений ТОП;

- разработана инженерная методика расчета и конструирования сдвигоустойчивых соединений ТОП;

- разработана эффективная конструкция ферм из ТОП с перекрестной решеткой на сдвигоустойчивых соединениях и обоснована технико-экономическая целесообразность ее применения;

- разработана инженерная методика расчета и конструирования ферм из ТОП с перекрестной решеткой на сдвигоустойчивых соединениях с учетом результатов экспериментальных исследований модели фермы.

Достоверность результатов обеспечена корректным использованием общепринятых методик исследований, использованием современного поверенного измерительного оборудования, использованием общепринятых теорий и методик расчета, а также применением современных сертифицированных программных комплексов, реализующих метод конечных элементов, по которым результаты расчетов имеют хорошую сходимость с результатами экспериментальных данных.

Практическая ценность работы заключается в разработке

- инженерной методики расчета и конструирования сдвигоустойчивых болтовых соединений ТОП;

- инженерной методики расчета и конструирования стропильных ферм из ТОП с перекрестной решеткой на сдвигоустойчивых соединениях.

Внедрение результатов.

Результаты диссертационных исследований нашли применение в:

1) ООО "Строительная компания НВМ" (630108, Россия, г.Новосибирск) при проектировании и строительстве объектов:

- стропильные фермы из легких стальных конструкций (ТОП) на объекте "Кровля здания компрессорной ФГУП НЗР "Оксид" по ул. Кирова 82" в г. Новосибирске;

- стропильные фермы из легких стальных конструкций (ТОП) на объекте "Реконструкция здания с надстройкой третьего этажа по ул. Глинки 10а" в г. Новосибирске.

2) ЗАО НТЦ "ЭРКОНСиб" (630102, Россия, г. Новосибирск) при проектировании объекта «Магазин в г. Колпашево Томской области».

Материалы диссертации используются в учебном процессе Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) по дисциплине "Металлические конструкции" и при проведении студенческих научно - исследовательских работ.

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных и теоретических исследований работы сдвигоустойчивых соединений ТОП;

- инженерная методика расчета и конструирования сдвигоустойчивых соединений ТОП;

- результаты экспериментальных и теоретических исследований работы конструкции ферм из ТОП с перекрестной решеткой на сдвигоустойчивых соединениях;

- инженерная методика расчета конструкции ферм из ТОП на сдвигоустойчивых соединениях;

- оценка целесообразности применения конструкции ферм из ТОП на сдвигоустойчивых соединениях в качестве несущих конструкций покрытия здания.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены:

- на Всероссийских научно-технических конференциях, проводимых в НГАСУ (Сибстрин) (г.Новосибирск) с 2009 по 2011 г.;

-на заседании научного межкафедрального семинара, проводимого в НГАСУ (Сибстрин) (г.Новосибирск) в 2011 г.;

- на кафедре металлоконструкций и испытаний сооружений СПбГАСУ (г.Санкт-Петербург) в 2011г.;

-на кафедре металлических конструкций ЛГТУ (г.Липецк) в 2011 г.;

-на заседании научного межкафедрального семинара, проводимого в СФУ (г.Красноярск) в 2011 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы. Три из них опубликованы в издании из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определенных ВАК РФ.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы, отмечена ее практическая значимость, сформулированы цель работы и основные задачи исследований.

**В первой главе** представлена область применения холодногнутой профили и приведен краткий обзор несущих конструкций на основе холодногнутой неоцинкованных и оцинкованных профилей. Дана краткая характеристика их достоинств и недостатков.

В главе приведен обзор исследований соединений холодногнутой ТОП. Результаты обзора показали, что в качестве крепежных элементов ТОП на сегодняшний день наибольшее распространение получили болты, самонарезающие винты и вытяжные заклепки. Несущая способность болтовых соединений существенно превосходит несущую способность соединений на самонарезающих винтах. На основании этого болтовые соединения получили широкое применение в наиболее ответственных узлах несущих конструкций из ТОП.

Исследованиям работы болтовых соединений холодногнутого ТОП посвящены работы зарубежных авторов W.K. Yu, K.F. Chung, M.F. Wong, Tae Soo Kima, Hitoshi Kuwamura, Chung K.F., Ip K.H. В нашей стране этим вопросам посвящены работы Э.Л. Айрумяна, В.В. Зверева, И.И. Крылова, А.С. Семенова, А.Н. Кретирина, Л.В. Енджиевского, А.В. Тарасова, в которых приведены результаты исследований соединений холодногнутого профиля с толщиной проката менее 4,0 мм. На основании экспериментальных исследований установлено влияние податливости болтовых соединений на работу стержневой конструкции из ТОП, приведены уточненные методики расчета соединений и элементов конструкций из ТОП. А.Н. Кретинин установил, что для ТОП более рационально применять сдвигоустойчивые соединения. Они обладают значительно большей расчетной несущей способностью в сравнении с соединениями, работающими на смятие. Им же на основании оценочных экспериментов получен коэффициент трения соприкасающихся оцинкованных поверхностей, равный  $\mu=0,45$ , и сделан вывод о необходимости более глубокого исследования особенностей их работы.

Произведен обзор исследований сдвигоустойчивых соединений в стальных и алюминиевых конструкциях. Результаты исследований таких соединений приведены в работах Т.М. Богданова, Б.М. Вейнבלата, А.Ф. Княжева, А.С. Чеснокова, Г.А. Мамлина, Б.И. Беляева, А.П. Савина, П. Биркома, J.G. Jonson, I.C. Cannon и L.A. Spooner. Данные результаты применимы для прокатных элементов толщиной более 4 мм. Авторами доказано, что сдвигоустойчивые соединения обладают большей несущей способностью по сравнению с обычными болтовыми соединениями.

**Вторая глава** посвящена экспериментально - теоретическим исследованиям работы сдвигоустойчивых соединений ТОП. Существующие результаты исследований работы сдвигоустойчивых соединений проведены для горячекатаных профилей с толщиной более 4,0 мм на болтах не менее М16. Исследуемые холодногнутые ТОП имеют толщину проката до 3,0 мм и подвергаются цинкованию, а наиболее распространенные болты для их соединения М8, М10 и М12. Учитывая это обстоятельство, необходимо было изучить особенности работы одно- и многоболтовых сдвигоустойчивых соединений ТОП.

Для экспериментальных исследований одноболтовые сдвигоустойчивые соединения ТОП собирались на болтах М10 с предварительным контролируемым натяжением, согласно рисунку 1. Отверстия под болты выполнялись сверлением с последующей подготовкой кромок (зачисткой от заусенцев). Соприкасающиеся поверхности подвергались очистке от грязи и обезжириванию. Реги-

страция напряженно-деформированного состояния (НДС) соединяемых элементов производилась при помощи тензорезисторов фольгового типа. Регистрация сдвигов соединений осуществлялась при помощи индикаторов часового типа. Для исключения влияния продольных деформаций основного металла соединяемых элементов часть соединений снабжалась выпусками из проволоки непосредственно в околоболтовой зоне. С целью определения влияния цинкового покрытия на коэффициент трения были приняты образцы с разными видами покрытия согласно классификации ГОСТ 14918-80 и разной толщиной цинкового покрытия (от 10,9 до 18,1 мкм). Для сравнения проводились испытания таких же соединений, но без предварительного натяжения болтов. Испытания проводились на растягивающие усилия до исчерпания несущей способности соединений.

По результатам серии испытаний соединений установлено:

- предельное состояние сдвигоустойчивых соединений наступает в результате смятия кромок отверстия соединяемых элементов после их взаимного срыва (сдвига);

- значение коэффициента трения соприкасающихся очищенных и обезжиренных поверхностей ТОП равно  $\mu=0,55$  (обеспеченность 0,95);

- вид и толщина цинкового покрытия по ГОСТ 14918-80 не оказывают существенного влияния на коэффициент трения;

- на работу сдвигоустойчивых соединений в значительной степени влияет качество подготовки кромок отверстия под болт перед сборкой; наличие незначительных заусенцев на кромках отверстия приводит к снижению нагрузки, соответствующей взаимному срыву, примерно в два раза;

- фактическая несущая способность одноболтовых сдвигоустойчивых соединений на 10-15% больше, чем у соединений без предварительного натяжения болтоконтактов;

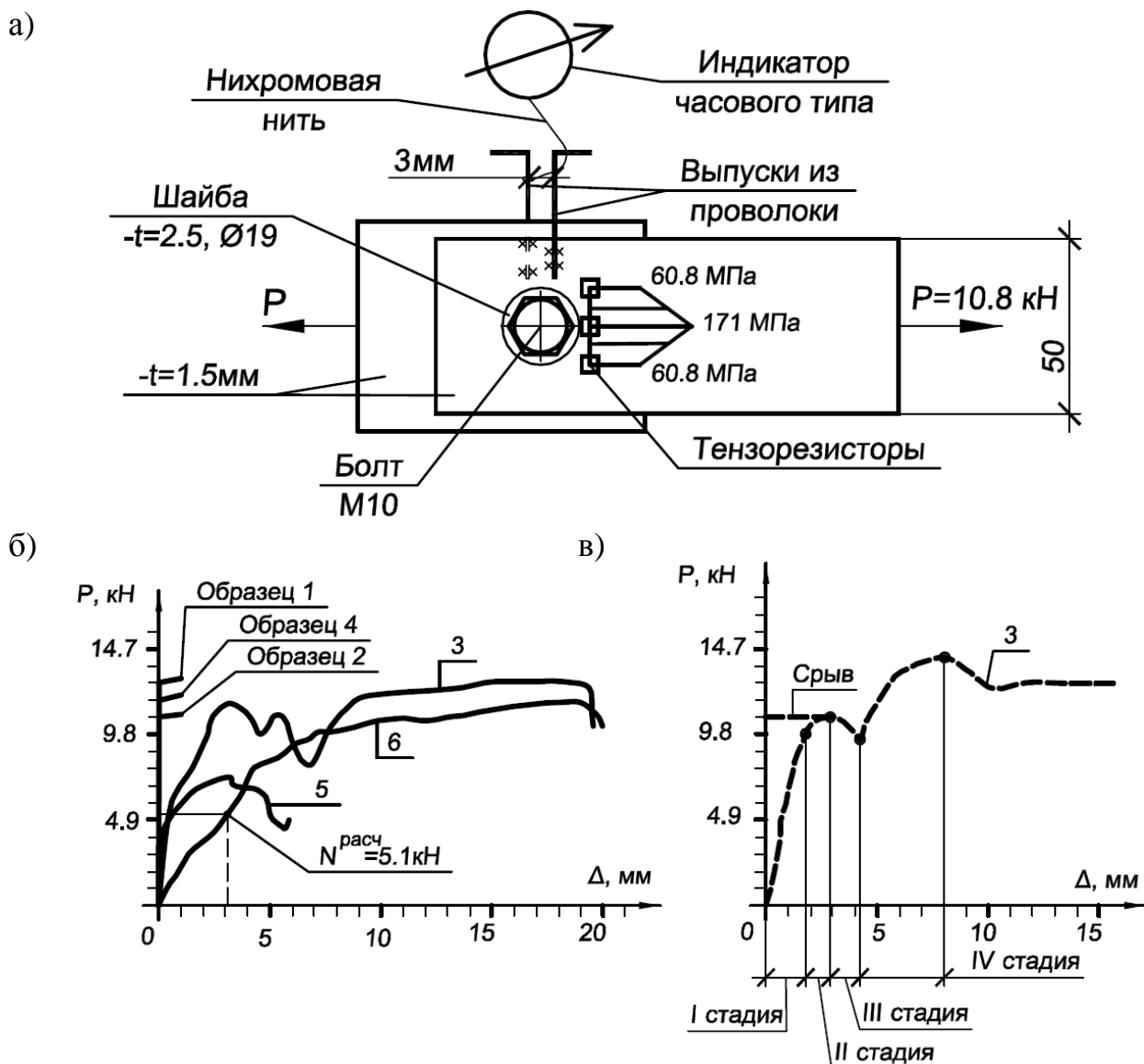
- упругая (линейная) стадия работы сдвигоустойчивых соединений до 2-х раз больше соединений без предварительного натяжения;

- на границе шайбы болтоконтакта со стороны усилия происходит концентрация напряжений ( $k=1,15$ ), что качественно соответствует напряженному состоянию сдвигоустойчивых соединений из толстолистового проката ( $t \geq 4$ мм).

Численное исследование одноболтового сдвигоустойчивого соединения позволило создать корректную расчетную схему соединения в программном комплексе, реализующем метод конечных элементов (МКЭ). Анализ НДС по результатам расчета показал, что уровень концентрации напряжений на границе шайбы болтоконтакта совпадает с экспериментальным с погрешностью не



более 5%. Результаты исследований одноболтовых сдвигоустойчивых соединений ТОП приведены на рисунке 1.



а) схема образца соединения; б) суммарные перемещения испытанных соединений ТОП; в) характерные стадии работы сдвигоустойчивых соединений ТОП.

1,4 – образцы с исключением влияния продольных деформаций основного металла (испытание до сдвига); 2 – результат численного расчета; 3 – образцы сдвигоустойчивого соединения; 5 – образцы без подготовки кромок отверстия (до разрушения не доводились); 6 – образец с болтом без предварительного натяжения; I стадия – упругая (линейная) работа; II стадия – неупругая (нелинейная) работа, III стадия – взаимный сдвиг, IV стадия – совместная работа болтоконтакта на трение и срез (смятие).

Рисунок 1 - Результаты исследований одноболтовых сдвигоустойчивых соединений ТОП

Далее приведены результаты экспериментальных исследований двух- и трехболтовых сдвигоустойчивых соединений на болтах М8 и М10 из листового оцинкованного проката  $t=1,5$  мм, представленных на рисунке 2.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить:

- работа сдвигоустойчивых соединений ТОП может происходить по двум или четырем стадийным схемам; количество стадий работы соединений зависит от соотношения расчетных усилий по критерию сдвига ( $N_{сдв}$ ) и по критерию достижения текучести по сечению брутто ( $N_{текуч}$ ); при  $N_{сдв}/N_{текуч}<1$  наблюдаются 4 стадии работы соединения, при  $N_{сдв}/N_{текуч} \geq 1$  – соответственно 2 стадии;

- фактический взаимный сдвиг многоболтовых соединений происходил при нагрузках меньше расчетных до 15%; в трехболтовых соединениях на болтах М10 сдвиг (срыв) происходил по первому болтоконтакту после достижения текучести ( $\sigma_t$ ) по сечению брутто соединяемых элементов.

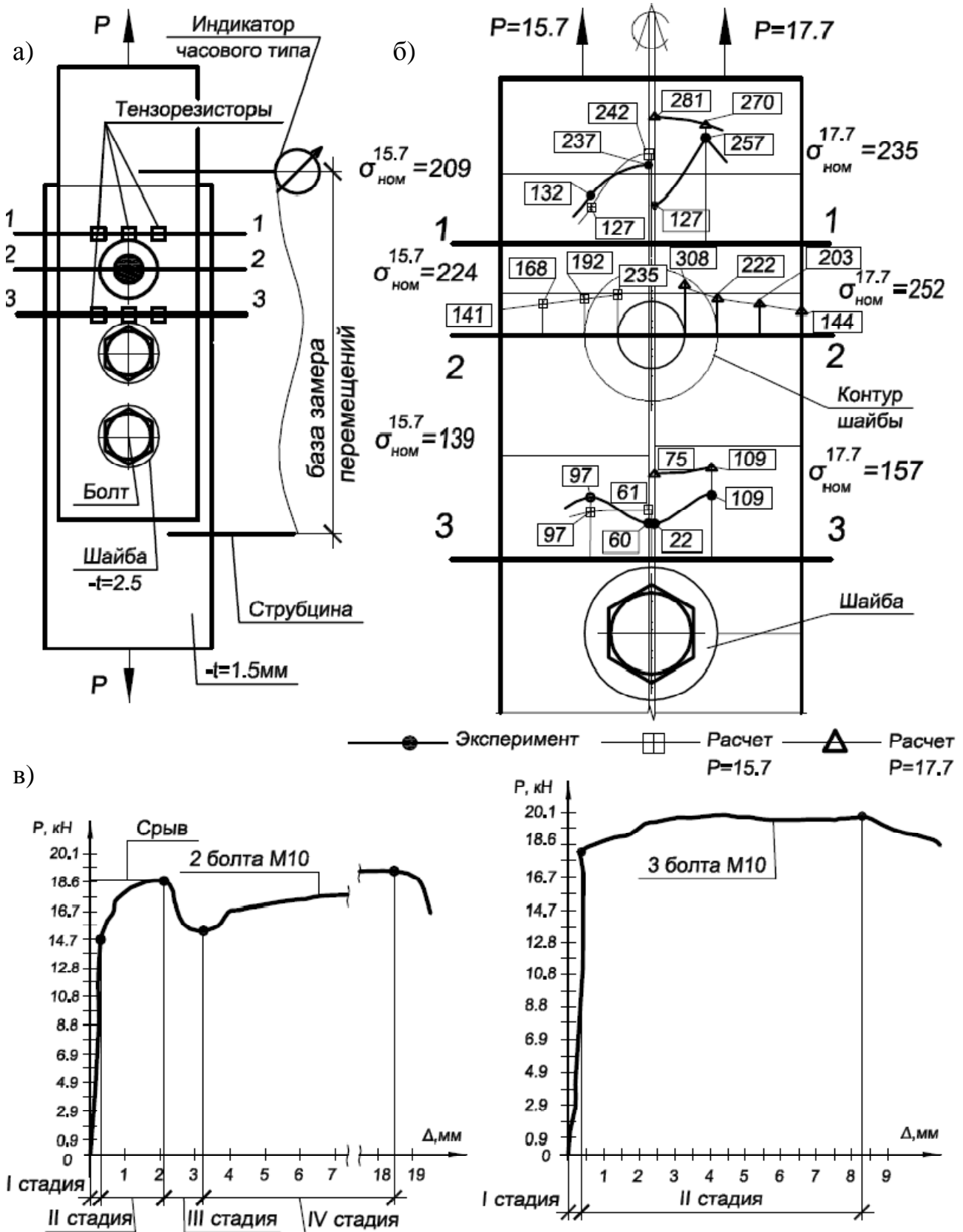
По результатам анализа НДС соединяемых элементов установлено:

- на границе шайб у первого болтоконтакта со стороны усилия наблюдается концентрация нормальных напряжений для упругой стадии работы  $k=1,15$ ; уровень напряжений на границе шайб у второго болтоконтакта меньше, чем у первого, в 1,3-4 раза.

- при достижении нагрузки на соединения величины  $0,9N_{текуч}$  пики нормальных напряжений смещаются в зоны напротив боковых границ отверстия первого болтоконтакта; это явление можно объяснить тем, что появление зон пластических деформаций на границе первого болтоконтакта ( $\sigma_{max}=k \times \sigma_{ном}$ , где  $k=1,15$ ) приводит к снижению усилия натяжения болта, проникновению пластических деформаций в ослабленное сечение и, как следствие, раннему преодолению сил трения (срыву).

Результаты исследований двух- и трехболтовых сдвигоустойчивых соединений ТОП показаны на рисунке 2.

Далее приведены результаты численного исследования НДС экспериментальных соединений, а также двухболтовых соединений с болтами поперек усилия в программном комплексе, реализующем МКЭ. Установлено, что НДС соединений с болтами вдоль усилия соответствует экспериментальным с погрешностью до 5%. В соединении с болтами поперек усилия концентрация напряжений на границе шайб болтоконтактов составляет  $k=1,13$ .



По результатам проведенных экспериментально-теоретических исследований предложена методика расчета сдвигоустойчивых соединений ТОП, основанная на требованиях СНиП II-23-81\*. Новизна методики заключается в применении условия  $\sigma_{ном} \leq R_y / \gamma_{bk}$ , где  $\sigma_{ном}$ -номинальные напряжения по сечению брутто на границе болтоконтакта со стороны усилия;  $R_y$  - расчетное сопротивление стали;  $\gamma_{bk}$  – коэффициент условия работы сдвигоустойчивого соединения ТОП, равный для листового проката  $\gamma_{bk} = 1,15$ , учитывающий влияние концентрации напряжений по первому ряду болтоконтактов на работу соединения.

**Третья глава** посвящена разработке эффективной конструкции ферм из ТОП на сдвигоустойчивых соединениях и экспериментально-теоретическому исследованию особенностей их работы. Предложена ферма с параллельными поясами составного таврового сечения и перекрестной решеткой из одиночных профилей, представленная на рисунке 3. Отличительными особенностями, характеризующими выбор данной конструкции фермы, являются:

1) параллельные пояса фермы, позволяющие применять равные длины элементов решетки и одинаковую конструкцию узлов; это обеспечивает высокую степень унификации и индустриализации элементов;

2) тавровые сечения поясов, позволяющие присоединять элементы решетки напрямую к стенке тавра и отказаться от дополнительных узловых фасонки;

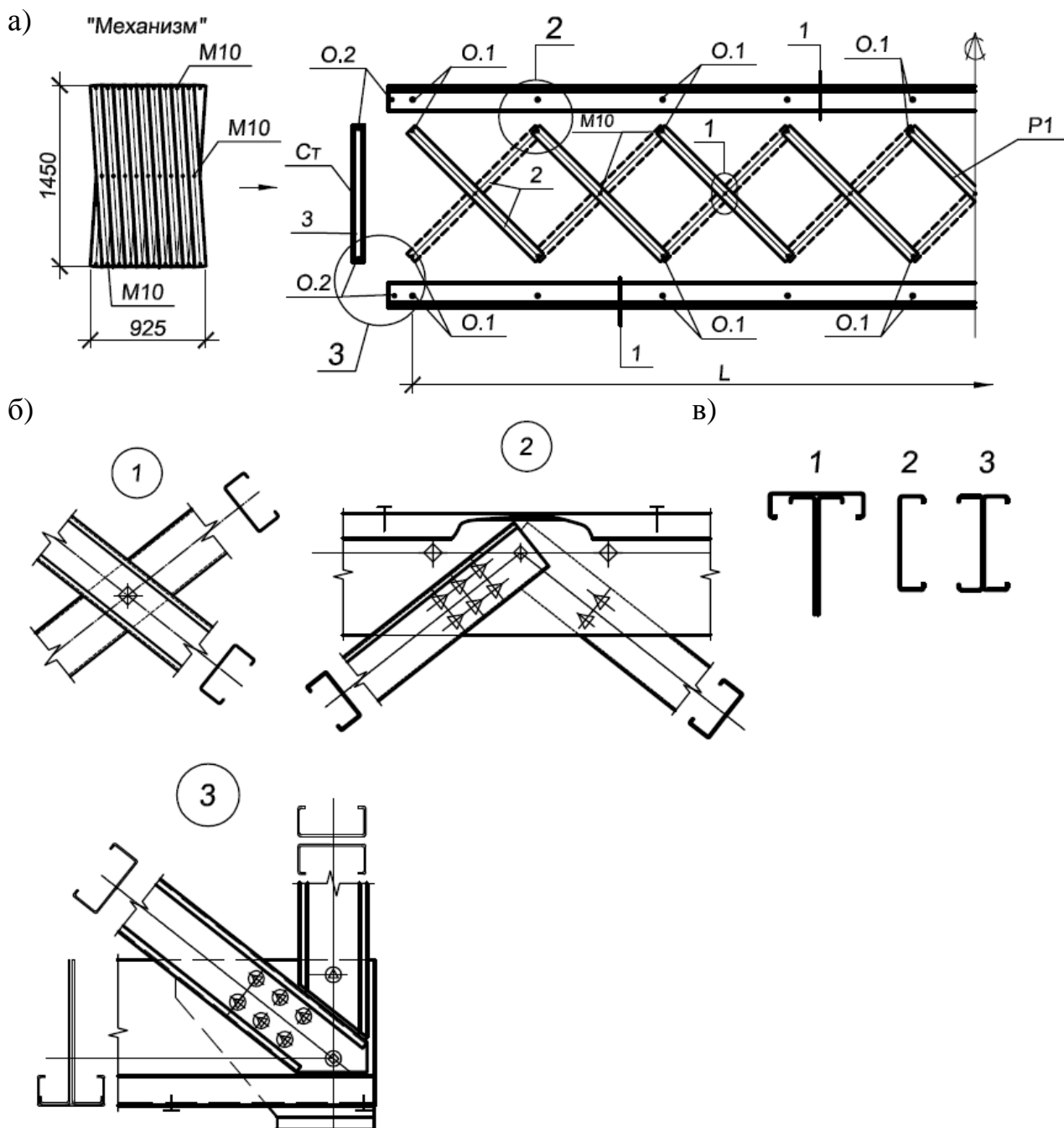
3) перекрестная решетка фермы, позволяющая уменьшить расчетную длину сжатых раскосов в плоскости и из плоскости фермы за счет поддерживающих растянутых;

4) перекрестная решетка фермы, позволяющая создать резерв несущей способности конструкции за счет ее внутренней статической неопределимости;

5) возможность выполнения решетки фермы в виде «механизма», собранного на болтах (рис.3, а), который трансформируется в плоские пакеты для транспортировки в компактном виде;

5) быстровозводимость на строительной площадке за счет растягивания решетки-«механизма» до нужной длины и фиксации болтами в заранее подготовленные монтажные отверстия О.1 и О.2 в поясах фермы (рис.3, а); после этого производится установка заданного количества крепежных элементов в каждый узел сопряжения элементов решетки с поясами фермы;

б) соединения элементов фермы выполняются на болтах.



а) схема изготовления фермы; б) основные узлы фермы;  
в) сечения элементов фермы

Рисунок 3 - Конструкция фермы с перекрестной решеткой из ТОП

На сегодняшний день известны результаты исследований конструкций ферм с поясами из прокатных тавров и перекрестной решеткой из одиночных уголков (толщина проката  $t \geq 4\text{мм}$ ). Исследованиями работы таких ферм занимались В.А. Балдин, В.И. Трофимов, В.В. Бирюлев, В.В. Волков, В.В. Берцин, В.Н. Васылаев, И.Ф. Баранцев и др. К особенностям работы таких ферм можно

отнести возникновение в элементах решетки, помимо продольных усилий, изгибающих моментов из плоскости фермы, вызванных эксцентриситетом их крепления к поясам. Существующие методики расчета ферм с поясами из тавров и перекрестной решеткой из одиночных профилей разработаны для горячекатаных профилей. Для изучения особенностей работы ферм из ТОП с перекрестной решеткой на сдвигоустойчивых соединениях производились экспериментальные и численные исследования модели фермы.

Модель фермы запроектирована и изготовлена из ТОП с параллельными поясами и перекрестной решеткой из одиночных С-образных профилей. Узловые соединения элементов экспериментальной фермы запроектированы сдвигоустойчивыми на болтах М10. Нагрузка на экспериментальную ферму принята сосредоточенной, приложенной симметрично в двух узлах верхнего пояса через распределительную траверсу. В опорных узлах фермы и монтажном стыке по нижнему поясу применялись стальные узловые фасонки  $t=4\text{мм}$ , которые подвергались цинкованию. Для регистрации НДС элементов решетки и узловых соединений они снабжались тензорезисторами фольгового и проволочного типа, согласно рисунку 4. За расчетное предельное состояние принята потеря местной устойчивости стенки опорного сжатого раскоса.

Статический расчет экспериментальной фермы производился с использованием программного комплекса SCAD Office и методик расчета, приведенных в СНиП II-23-81\*. Для уточнения расчетной схемы фермы было рассмотрено три варианта: 1) плоская схема с жестким креплением элементов решетки к поясам фермы при количестве болтов в узлах 2 и более; 2) плоская схема с шарнирным примыканием элементов решетки к поясам фермы; 3) пространственная схема с введением специальных узловых элементов - "жесткие вставки", позволяющих имитировать эксцентриситет передачи нагрузки на раскосы решетки из плоскости фермы.

Испытание фермы происходило в два этапа. Первый этап – для исследования работы фермы до наступления расчетного предельного состояния по критерию потери местной устойчивости опорного сжатого раскоса. Второй этап – для выявления резервов несущей способности конструкции.

В результате проведения первого этапа испытания установлено:

- потеря местной устойчивости стенки опорного сжатого раскоса (ОР1), предшествующая потере его общей устойчивости, произошла при нагрузке на 28% больше расчетной, определенной по СНиП II-23-81\* с учетом фактических характеристик стали, и на 11% больше определенной по Eurocode 3 EN 1993-1-3;

- после исчерпания несущей способности сжатого опорного раскоса (ОР1) в результате потери его общей устойчивости произошло перераспределение усилий между элементами решетки и, как следствие, сдвиг (срыв) в узле крепления растянутого опорного раскоса (ОР3) к верхнему поясу фермы.

Для выявления возможных резервов несущей способности фермы после ее разгрузки было произведено усиление узлов растянутых опорных раскосов. В эти узлы дополнительно установили по два болтокомплекта с последующим их натяжением и провели второй этап эксперимента. Восстановление опорного восходящего раскоса после потери местной и далее общей устойчивости на первом этапе испытания не производилось. Ферма работала с растянутыми нисходящими опорными раскосами. После приращения нагрузки на 15% больше нагрузки наступления расчетного предельного состояния фермы стали наблюдаться значительные деформации кручения верхнего пояса фермы в узле Д1 (рис. 4), не позволявшие дальнейшего увеличения нагрузки.

В результате анализа и сравнения результатов эксперимента с расчетными установлено:

- наиболее корректной расчетной схемой для выявления несущей способности по критериям прочности и устойчивости является схема с шарнирным примыканием элементов решетки к поясам (погрешность до 10%).

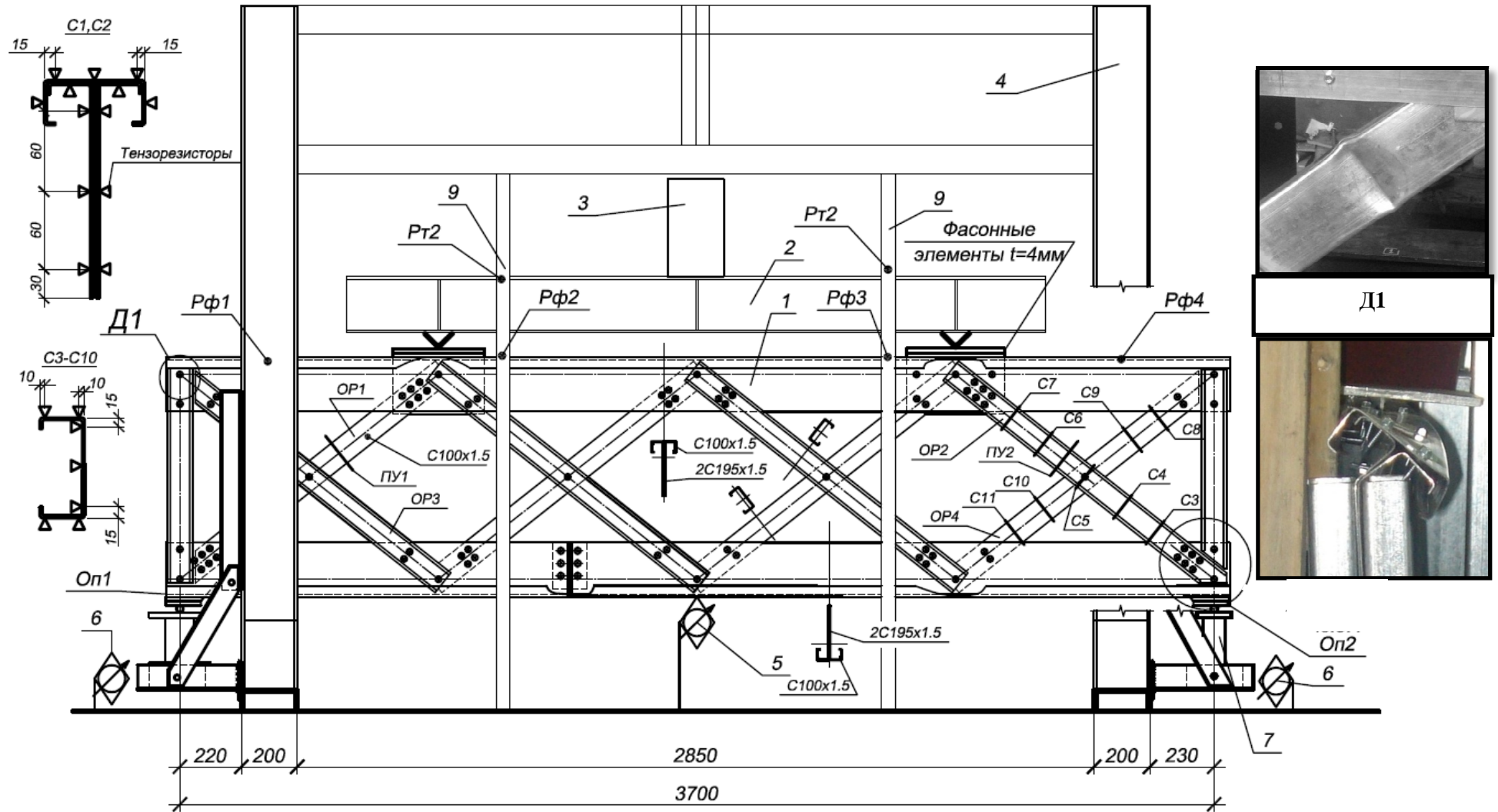
- прогибы, определенные по пространственной расчетной схеме, наиболее близки к экспериментальным (погрешность до 25%);

- растянутый раскос раскрепляет сжатый из плоскости; коэффициент приведения расчетной длины сжатого раскоса из плоскости допускается определять по Пособию к СНиП II-23-81\*;

- на основании анализа экспериментального и расчетного напряженно-деформированного состояния элементов перекрестной решетки установлено, что геометрическую длину сжатых раскосов при определении расчетной допускается принимать с учетом коэффициента  $\gamma_c=0,9$  (обеспеченность 0,95), учитывающего влияние жесткости узлов крепления раскосов решетки к поясам;

- моменты в плоскости фермы, возникающие в стержнях решетки, не существенны и могут не учитываться в расчете, что установлено сравнением расчетных и экспериментальных НДС по сечениям раскосов;

- характер распределения напряжений по элементам составных сечений поясов фермы свидетельствует об их совместной работе.



1-испытываемая модель фермы; 2-распределительная траверса; 3-гидравлический домкрат; 4-силовая рама; 5- прогибомеры; 6-индикаторы часового типа; 7-динамометр; 9- рама для раскрепления верхнего пояса и траверсы; Pф1...Pф4 - места раскрепления фермы от потери устойчивости из плоскости; Pt2-места раскрепления траверсы.

Рисунок 4 -Общий вид экспериментальной фермы в силовой раме



На основании анализа НДС узловых соединений установлено:

- коэффициент концентрации нормальных напряжений на границе болтоконтактов со стороны усилия для узлов сопряжения раскосов решетки с поясами фермы  $k=2,85$ , а в монтажном стыке по поясу фермы  $k=5$ ; увеличенное значение коэффициентов концентрации по сравнению с листовым прокатом, объясняется сгущением силового потока со всего сечения на участках под головкой первого ряда болтоконтактов;

По результатам эксперимента рекомендовано:

- для повышения несущей способности ферм сечения сжатых опорных раскосов принимать в соответствии с рисунком 5, а,б,в,г, так как указанные сечения не препятствуют изготовлению перекрестной решетки фермы в виде "механизма";

- для повышения жесткости на кручение верхнего пояса фермы принимать сечение приведенное на рисунке 5, д; в узлах примыкания раскосов решетки полки обрезаются;

- проектное количество болтов в узлах опорных элементов (сжатый раскос, растянутый раскос, стойка) определять по усилию опорного сжатого раскоса.

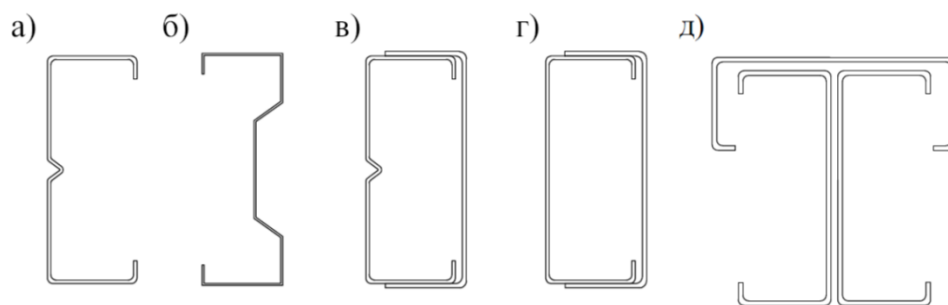
Эффективность применения сечений, приведенных на рисунке 5, а,б,в,г, оценивалась сравнением их расчетной несущей способности (по методикам СНиП II-23-81\* и Eurocode 3 EN 1993-1-3) по критериям потери местной и общей устойчивости и прочности.

По результатам расчета установлено:

-методика СНиП II-23-81\* не может быть применима к элементам с продольными ребрами жесткости в виде гофры или к  $\Sigma$ -профилям, т.к. не позволяет определять редуцированные характеристики сжатой зоны таких сечений;

-расчетная несущая способность элементов из ТОП, представленных на рисунке 5, а,б,в,г, по критерию потери местной устойчивости стенки больше, чем у С-образных профилей от 25 до 50%.

Для разработки рекомендаций по расстановке болтоконтактов в узловых соединениях фермы и поиска решений по снижению в них концентрации напряжений производилось их численное исследование с использованием программного комплекса реализующего МКЭ. Создавались расчетные модели узловых соединений фермы на основе наиболее распространенных ТОП на болтах М8, М10, М12.



а) С-образное сечение с продольным ребром жесткости; б)  $\Sigma$ -профиль;  
 в) составное сечение из С-образного профиля с продольной гофрой и П-профиля; г) составное сечение из С-профиля и П-профиля; д) составное сечение поясов.

Рисунок 5 - Рекомендуемые сечения элементов для предлагаемой конструкции ферм

Модели включали в себя разное количество болтов, а также дополнительные накладные пластины в узлах составного таврового сечения поясов фермы. Количество болтов принято из условия обеспечения равной несущей способности сечений элементов фермы и несущей способности соединений с учетом требований норм по размещению болтов.

Согласно расчетам:

- размещение максимально большого количества болтов по первому ряду со стороны усилия позволяет снизить концентрацию нормальных напряжений на границе болтоконтактов до 50%;

- установлены значения коэффициента условия работы сдвигоустойчивых соединений ТОП ( $\gamma_{bk}$ ) на болтах М8, М10, М12 в зависимости от их количества по ширине соединения при креплении раскосов через стенку (таблица 1);

- в узле стыков пояса фермы по длине необходимо вводить дополнительную накладку по полке сечения;

- коэффициент условия работы сдвигоустойчивого соединения ТОП в узле стыка по поясам фермы допускается принимать  $\gamma_{bk}=1,35$  при условии размещения максимального количества болтов по первому ряду со стороны усилия.

Таблица 1- Коэффициент условия работы  $\gamma_{bk}$  сдвиго-устойчивых соединений ТОП

Кол-во болтов по высоте стенки профиля	Высота сечения элемента, мм			
	100	152	195	250
2	2,83	-	-	-
3	2,29	2,62	-	-
4	2,03	2,28	2,38	2,59
5	-	1,92	2,14	2,15
6	-	1,85	1,86	1,92
7	-	-	1,84	1,79
8	-	-	1,76	1,65

**Примечания:**

1. Коэффициент  $\gamma_{bk}$  приведен для соединений на болтах М8.
2. Для соединений на болтах М10 и М12 значение  $\gamma_{bk}$  следует умножать на 0,95 и 0,9 соответственно.
3. Коэффициенты действительны для сечений с шириной полки не более 60 мм.

**В четвертой главе** представлена инженерная методика расчета и конструирования разработанной конструкции ферм. Методика основана на положениях СНиП II-23-81\*, Eurocode 3 EN 1993-1-3 и результатах экспериментально-теоретических исследований.

Новизна методики заключается в следующем:

1) при определении усилий в элементах фермы следует применять плоскую расчетную схему с шарнирным примыканием элементов решетки к поясам; при определении вертикальных прогибов фермы следует применять пространственную расчетную схему с введением "жестких вставок" в узловые соединения;

2) при проверке устойчивости сжато-изгибаемых элементов решетки необходимо учитывать дополнительный изгибающий момент из плоскости фермы ( $\Delta M_y$ ) от смещения центра тяжести сечения в результате его редуцирования:

$$\frac{N}{\varphi_y \cdot N_{cr}} \pm \frac{M_{y,1}}{M_{y,cr}} \pm \frac{B}{B_{cr}} \leq \gamma_c, \quad (1)$$

где  $N$ ,  $M_{y,l}$  - усилия в элементе;  $\varphi_y$  - понижающий коэффициент при плоской форме потери устойчивости, определяемый по СНиП II-23-81\*;  $N_{cr}$ - критическое продольное усилие, равное  $N_{cr}=A_{eff} \cdot R_y$ ;  $A_{eff}$  - площадь редуцированного сечения;  $M_{y,l}$ - изгибающий момент редуцированного сечения, равный  $M_{y,l} = k_{yy} \cdot C_{m,y} \cdot (M_y + \Delta M_y)$ ;  $k_{yy}$  — коэффициент взаимодействия, определяемый по EN 1993-1-3;  $C_{m,y}$ — коэффициент перехода к эквивалентной прямоугольной эпюре моментов по EN 1993-1-3;  $M_y$  - изгибающий момент первоначального сечения;  $\Delta M_y$  — момент от смещения центра тяжести сечения при редуцировании, равный  $\Delta M_y = \Delta e \cdot N$ , где  $\Delta e$ - эксцентриситет от смещения центра тяжести редуцированного сечения;  $M_{cr,y}$ - критический изгибающий момент, равный  $M_{cr,y} = R_y \cdot W_y$ ;  $W_y$ -момент сопротивления сечения;  $B$ - бимомент, равный  $B = N \cdot \omega$ ;  $\omega$ - секториальная координата точки приложения силы;  $B_{cr}$ -критический бимомент, равный  $B_{cr} = I_{\omega} \cdot R_y / \omega_k$ ;  $I_{\omega}$ - секториальный момент инерции;  $\omega_k$ - секториальная координата рассматриваемой точки сечения;

3) при определении расчетной длины сжатых раскосов фермы введен экспериментальный коэффициент  $\gamma_c = 0,9$  (обеспеченность 0,95), позволяющий учитывать жесткость узлов крепления раскосов решетки к поясам;

4) при расчете сдвигоустойчивых соединений применен коэффициент трения соприкасающихся поверхностей ТОП в составе сдвигоустойчивого соединения  $\mu = 0,55$ ;

5) при расчете сдвигоустойчивых соединений ТОП применен коэффициент условия работы  $\gamma_{bk}$ , учитывающий влияние концентрации напряжений на границе первого ряда болтоконтактов на работу соединения:

$$\sigma_{ном} \leq \frac{R_y}{\gamma_{bk}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{ном}$ - номинальные напряжения по сечению элемента;

$\gamma_{bk}$ - коэффициент, условия работы сдвигоустойчивого соединения ТОП, определяемый по таблице 1; для составных сечений верхнего и нижнего поясов при условии постановки максимального количества болтоконтактов по первому ряду  $\gamma_{bk} = 1,35$ ;

б) разработаны рекомендации по конструированию сдвигоустойчивых соединений ТОП, основные положения которых заключаются в следующем:

-при конструировании сдвигоустойчивых болтовых соединений необходимо количество болтов принимать максимально возможным по высоте (ширине) соединения, но не менее двух;

-размещение болтов вдоль и поперек соединения производить с одинаковым шагом, соблюдая симметричность относительно продольной и попереч-

ной оси соединения; при размещении болтов вдоль соединения каждый последующий ряд должен быть идентичным первому;

-минимальное расстояние между центрами болтов в любом направлении -  $2,5d$ , максимальное при растяжении -  $8d$ , при сжатии -  $2,5d$  или  $18t$ ; минимальное расстояние от центра болта до края элемента -  $1,3d$ , максимальное  $2d$ , где  $d$  - диаметр отверстия для болта.

В главе приводятся рекомендуемая область применения разработанных ферм и рекомендуемые варианты компоновки покрытия. Используя результаты расчета ряда предлагаемых ферм с отношением высоты сечения к пролету от  $1/15$  до  $1/8$ , было определено рациональное соотношение по критерию расхода металла на единицу перекрываемой площади, равное -  $1/10$ .

Представлены результаты технико-экономической оценки целесообразности применения в покрытии здания разработанной конструкции ферм, в сравнении с одними из наиболее экономичных вариантов покрытия, используемых в настоящее время – решение со стропильными фермами из гнутосварных профилей (ГСП) прямоугольного сечения по типу «Молодечно» и балкой из тонкостенных оцинкованных профилей. Установлено, что разработанная конструкция ферм позволяет снизить общую стоимость конструкций покрытия до 10% по сравнению с балкой из ТОП и до 15% по сравнению с фермой из гнутосварных профилей.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработанное конструктивное решение ферм на основе холодногнутой ТОП на сдвигоустойчивых болтовых соединениях может быть рекомендовано в качестве стропильных несущих конструкций зданий пролетами до 18 м. Отличительной особенностью данной конструкции является решетка в виде «механизма», обеспечивающая компактность при транспортировке и быстровозводимость в условиях строительной площадки.

2. После потери устойчивости сжатого опорного раскоса резерв несущей способности фермы составляет не менее 15%.

3. Разработана инженерная методика расчета конструкции ферм из холодногнутой ТОП с перекрестной решеткой на сдвигоустойчивых болтовых соединениях, основанная на положениях СНиП II-23-81\*, EN 1993-1-3:2004 и результатах экспериментально - теоретических исследований.

4. Экспериментально получен коэффициент трения соприкасающихся поверхностей тонкостенных оцинкованных профилей в составе сдвигоустойчивого болтового соединения, равный  $\mu=0,55$ .

5. Установлено, что появление зон пластических деформаций на границе первого ряда болтоконтактов приводит к раннему преодолению сил трения (срыву). Определены коэффициенты условия работы сдвигоустойчивых соединений ТОП, зависящие от количества болтов в соединении.

6. Разработана инженерная методика расчета и конструирования сдвигоустойчивых болтовых соединений ТОП.

7. Установлено, что разработанная конструкция ферм позволяет снизить общую стоимость конструкций покрытия до 10% по сравнению с балкой из ТОП и до 15% по сравнению с фермой из гнutosварных профилей.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

1. Коротких А.В. Особенности работы одноболтовых фрикционных сдвигоустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей [Текст] / А.В. Коротких, А.Н. Кретинин, И.И. Крылов // Изв.вузов. Строительство.- 2009.- № 10.- С. 117-122.

2. Коротких А.В. Особенности работы двух- и трехболтовых фрикционных сдвигоустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей [Текст] / А.В. Коротких, И.И. Крылов, В.Г. Черкасов // Изв.вузов. Строительство.- 2011.- № 2.- С. 3-14.

3. Коротких А.В. Особенности работы одно- и многоболтовых фрикционных сдвигоустойчивых соединений тонкостенных оцинкованных профилей [Текст] / А.В. Коротких, А.Н. Кретинин, И.И. Крылов // Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве и архитектуре: Сборник статей международной конференции.- Липецк: ЛГТУ, 2009.- С. 48-52.

4. Коротких А.В. Особенности работы фермы с перекрестной решеткой из тонкостенных оцинкованных профилей [Текст] / А.В. Коротких, И.И. Крылов, А.А. Гербер// Изв.вузов. Строительство.- 2011.- №10.- С. 9-20.

**Коротких Александр Васильевич**

**ФЕРМЫ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ ОЦИНКОВАННЫХ  
ПРОФИЛЕЙ С ПЕРЕКРЕСТНОЙ РЕШЕТКОЙ НА  
СДВИГОУСТОЙЧИВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 11.01.2012  
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,2  
Тираж 120 экз. Заказ 5932

Отпечатано полиграфическим центром  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041 Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел/факс (391)249-74-81, 249-73-55  
E-mail: [print\\_sfu@mail.ru](mailto:print_sfu@mail.ru); <http://lib.sfu-kras.ru>