

ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт _____ Архитектурно-строительный _____
Кафедра _____ Строительное производство и теория сооружений _____

Работа (проект) проверена
Рецензент,

Допустить к защите

_____ И.О. _____ должность _____
_____ Ф.И.О. _____
_____ 06 _____ 2018 г.

Заведующий кафедрой Пикус. Г.А.
_____ « 20 » 06 2018 г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
бакалавра по направлению «Строительство»

Тема: _____ Разработка высокоточной конечно-элементной модели термопрофилей и
исследование влияния перфорации стенки на прочность в условиях поперечного

ЮУрГУ-ВКР

000 ПЗ

Руководитель работы

_____ к.т.н. доцент _____ должность _____
Дегтярева Н.В. _____ Ф.И.О. _____
_____ « 20 » июня 2018 г.

Автор работы

студент группы _____ АС-420 _____
Резов А.Е. _____ Ф.И.О. _____
_____ « 20 » 06 2018 г.

Антиплагиат Оценка оригинальности 97%

_____ к.т.н. доцент _____ должность _____
Дегтярева Н.В. _____ Ф.И.О. _____
_____ « 20 » июня 2018 г.

Нормоконтролер

_____ к.т.н. доцент _____ должность _____
Дегтярева Н.В. _____ Ф.И.О. _____
_____ « 20 » июня 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Резов А.Е. Разработка высокоточной конечно-элементной модели термопрофилей и исследование влияния перфорации стенки на прочность в условиях поперечного изгиба:
ЮУрГУ, 2018. 67с

В дипломной работе проведен анализ экспериментальной установки, её особенностей и преимуществ. На основе этих данных построена конечно-элементная модель в программном комплексе ANSYS Mechanical в классическом интерфейсе ADPL. Учтены нелинейная работа материала профилей, начальные геометрические несовершенства по первым четырем формам потери устойчивости, условия закрепления, симметрии и приложения нагрузки. Произведена верификация конечно-элементной модели и успешное сравнение результатов моделирования с экспериментом. Сделан вывод о справедливости принятых решений и возможности построения термопрофилей. Созданы конечно-элементные модели термопрофилей, совершен расчет. Сделаны выводы и написана рекомендация.

| | | | | | |
|---|------|----------------|------|--------|------|
| <h3 style="margin: 0;">270102-2018-209-ПЗ</h3> | | | | | |
| Изм. | Коп. | Лист | Нерк | Подп. | Дата |
| Зав. каф. | | Пикус Г.А. | | | |
| Руковод. | | Дегтярева Н.В. | | | |
| Н. контр. | | Дегтярева Н.В. | | | |
| Разраб. | | Резов А.Е. | | | |
| Разработка высокоточной конечно-элементной модели термопрофилей и исследование влияния перфорации стенки на прочность в условиях поперечного изгиба | | | | | |
| | | Стадия | Лист | Листов | |
| | | ДП | 2 | 67 | |
| ЮУрГУ кафедра СТПС | | | | | |

Оглавление

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1. База данных с результатами испытаний..... | 6 |
| 1.1 Описание испытываемых профилей и экспериментальной установки.... | 7 |
| 1.2 Результаты описания гнутых профилей..... | 14 |
| 2. Построение расчетных моделей испытанных гнутых профилей..... | 16 |
| 2.1 Конечно-элементная модель..... | 17 |
| 2.2 Выбор размера конечных элементов..... | 29 |
| 2.3 Типы конечных элементов..... | 30 |
| 2.4 Граничные условия..... | 31 |
| 2.5 Влияние начальных несовершенств..... | 35 |
| 2.6 Этапы расчета..... | 36 |
| 3. Верификация конечно-элементных моделей..... | 40 |
| 3.1 Сравнение результатов моделирования с результатами испытаний..... | 42 |
| 4. Построение моделей термопрофилей..... | 53 |
| 5. Выводы и рекомендации..... | 63 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 66 |

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 3 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

Введение

Легкие стальные тонкостенные конструкции обширно используются по всему миру благодаря малым расходу стали и удельному весу, быстрому и простому всепогодному монтажу без использования тяжелой строительной техники, экономичности и экологичности, а также продолжительному сроку эксплуатации.

Термопрофилем является гнутый холодно деформированный профиль с термопросечками в стенке, что значительно уменьшает теплопроводность данного элемента, тем самым исключая появление «мостиков холода», обеспечивая теплотехническую эффективность использования ЛСТК в качестве ограждающих конструкций [1], [2]. Кроме того, термопросечки вследствие «затягивания» ионами цинка ионов достаточно тонкого для этого явления поперечного сечения металла не уменьшают антикоррозионную защиту, не смотря на то, что были нанесены после оцинковки.

3 декабря 2016 года вышел приказ об утверждении на территории Российской Федерации свода правил о правилах проектирования стальных тонкостенных конструкций, в том числе и термопрофилей [3].

Но в нем есть ограничения по расчету профилей, имеющих определенные геометрические характеристики пункт 7.1.1 Так же в это документе указано о возможности применения численных методов для учета влияния потери устойчивости формы сечения 7.3.1.6. Что говорит о несовершенстве данного способа расчета и требует его развития, а в первую очередь, накопления обширной базы экспериментальных и численных исследований данных тонкостенных конструкций.

В настоящий момент существуют отечественные экспериментально-теоретические исследования термопрофилей на основе метода конечных элементов, такие как, [4] на сжатие; [5] на срез, [6] чистый изгиб. Логическим продолжением будет изучение влияния термопросечек на прочность при поперечном изгибе, на который работают прогоны покрытий и ограждающих конструкций.

| | | | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|--------------------|------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | Лист |
| | | | | | | 4 |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат | | |

В зарубежной литературе также присутствует широкий интерес к действию на прочность перфорации термопрофилей: [7] чистый изгиб, сжатие; [8] чистый изгиб; [9] продольный изгиб. Информации о прочности термопрофиля при поперечном изгибе в иностранных исследованиях не представлена.

Практически во всех изученных работах присутствует учет начальных несовершенств, какие могут значительно повлиять на полученные результаты, что подробно описано в подпункте 2.5

Цель – исследование влияния перфорации в виде термопросечек на прочность термопрофиля в условиях поперечного изгиба и разработка высокоточной конечно-элементной модели в программном комплексе «ANSYS» .

Для достижения этой задачи была найдена и проанализирована база экспериментальных данных, соответствующая выбранной теме.

К сожалению, стандарты на используемые в ходе опытов конструктивные элементы не уточнены в австралийских отчетах и отсутствуют в открытом доступе. Поэтому в данной работе было принято решение ссылаться на отечественные сортаменты, взятые ориентировочно зарубежным. Что дает возможность провести аналогичный эксперимент в России.

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 5 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

1. База данных с результатами испытаний

| | | | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|--------------------|------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | Лист |
| | | | | | | 6 |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат | | |

1.1 Описание испытываемых профилей и экспериментальной установки

Моделировались эмпирические исследования высокопрочных холодногнутох профилей С-образного сечения по австралийским отчетам [10], [11]. В докладах приведены результаты 24-ых экспериментов, в которых размеры и характеристики профилей соответствуют данным таблицы 1.1.1

Таблица 1.1.1

| № испытания | Наименование | Типоразмер | t, мм | D, мм | B, мм | C, мм |
|-------------|--------------|------------|-------|--------|-------|-------|
| 1 | MV-150-15-1 | C15015 | 1,5 | 153,25 | 64,27 | 15,95 |
| 2 | MV-150-15-2 | | 1,5 | 153,44 | 64,64 | 15,95 |
| 3 | MV-150-15-3 | | 1,5 | 153,24 | 64,87 | 15,95 |
| 4 | MV-150-15-4w | | 1,5 | 153,38 | 64,38 | 15,92 |
| 5 | MV-150-19-1 | C15019 | 1,9 | 153,66 | 65,63 | 16,41 |
| 6 | MV-150-19-2 | | 1,9 | 153,38 | 65,82 | 16,46 |
| 7 | MV-150-19-3 | | 1,9 | 153,1 | 65,75 | 16,07 |
| 8 | MV-150-19-4w | | 1,9 | 153,54 | 65,82 | 16,28 |
| 9 | MV-150-24-1 | C15024 | 2,4 | 152,93 | 62,76 | 17,5 |
| 10 | MV-150-24-2 | | 2,4 | 152,9 | 62,74 | 17,35 |
| 11 | MV-150-24-3 | | 2,4 | 152,75 | 62,88 | 19,55 |
| 12 | MV-150-24-4w | | 2,4 | 152,98 | 62,58 | 17,62 |
| 13 | MV-200-15-1 | C20015 | 1,5 | 204,06 | 76,75 | 16,41 |
| 14 | MV-200-15-2 | | 1,5 | 204,25 | 76,52 | 16,1 |
| 15 | MV-200-15-3 | | 1,5 | 203,59 | 77,04 | 16,19 |
| 16 | MV-200-15-4w | | 1,5 | 203,96 | 76,92 | 16,38 |
| 17 | MV-200-19-1 | C20019 | 1,9 | 202,45 | 78,66 | 17,67 |
| 18 | MV-200-19-2 | | 1,9 | 202,32 | 78,73 | 17,57 |
| 19 | MV-200-19-3 | | 1,9 | 202,53 | 78,32 | 17,34 |
| 20 | MV-200-19-4w | | 1,9 | 202,42 | 78,48 | 17,46 |
| 21 | MV-200-24-1 | C20024 | 2,4 | 203,46 | 75,04 | 19,28 |
| 22 | MV-200-24-2 | | 2,4 | 203,39 | 75,48 | 20,73 |
| 23 | MV-200-24-3 | | 2,4 | 203,24 | 75,47 | 20,65 |
| 24 | MV-200-24-4w | | 2,4 | 203,78 | 75,02 | 19,04 |

Обозначение наименований опытов: «MV-R-T-X»

где MV – эксперимент на поперечный изгиб;

R – приблизительная высота секции, мм;

T – толщина сечения, десятые доли мм;

X - номер эксперимента данного типоразмера, «w» - испытание без уголков между верхними полками профилей и центральной опорной пластиной.

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 7 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

Геометрия сечения показана на рисунке 5

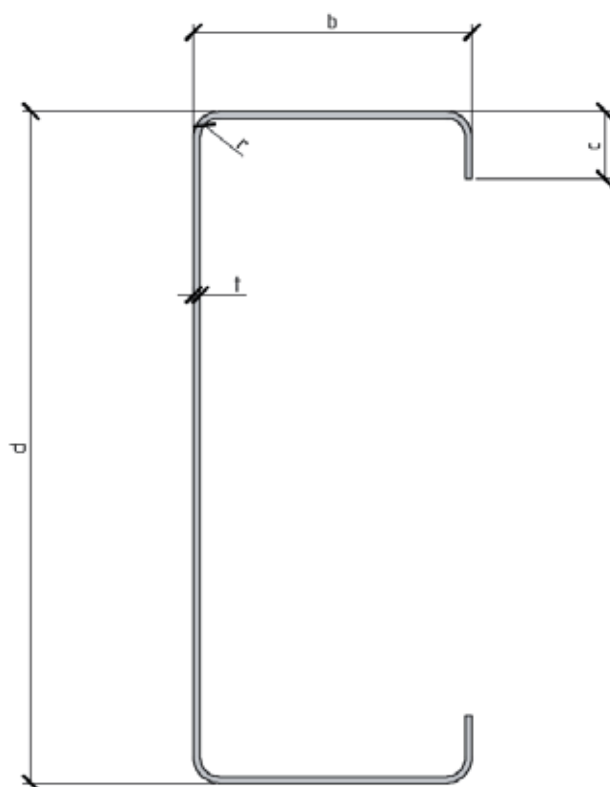


Рисунок 1.1.1 – Поперечное сечение профиля. d , b , t – высота, ширина и толщина секции соответственно, мм; c – высота «губы»; r – внутренний радиус сгиба

Класс прочности стали 550 МПа

Каждый эксперимент проводился одновременно над двумя профилями так, как показано на рисунках 1.1.2-1.1.3 Спецификация используемых конструктивных элементов для испытания профилей типоразмеров С20015, С20019, С20024 (С200) дана в таблице 1.1.2

| | | | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|--------------------|------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | Лист |
| | | | | | | 8 |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат | | |

Таблица 1.1.2

| Спецификация элементов экспериментальной установки для профиля С200 | | | | | |
|---|---|---|---------------------------|------------|--|
| Поз. | Наименование | Ориентировочный отечественный сортament | Габаритный размер, мм | Кол-во, шт | Примечание |
| 1 | Испытываемый профиль | Сортament холодногну­тых профилей из оцинкованной стали для строительства | 205x76x1000 | 2 | |
| 2 | Оголовок сферического шарнира | - | 150x150x225 | 1 | |
| 3 | Центральная опорная пластина | ГОСТ 19903-2015 | 20x150x408 | 1 | |
| 4 | Крайняя опорная пластина | ГОСТ 19903-2015 | 20x100x408 | 2 | |
| 5 | Центральный холодногнутый профиль С-образного сечения | Сортament холодногну­тых профилей из оцинкованной стали для строительства | 250x90x150 толщина 6 | 2 | |
| 6 | Крайний холодногнутый профиль С-образного сечения | | 250x90x100 толщина 6 | 4 | |
| 7 | Ребро жесткости | ГОСТ 19903-2015 | 250x90x6 | 24 | |
| 8 | Равнополочный уголок 25x5 | ГОСТ 8509-93 | 25x25x200 | 8 | 6 штук для второго варианта оснастки |
| 9 | Опорный полуцилиндр | - | R75, длина 230 | 2 | |
| 10 | Болты высокопрочные | ГОСТ Р 52644-2006 | M12x1.5x280 | 20 | 16 штук в установке для профиля С150 |
| 11 | Болты высокопрочные | ГОСТ Р 52644-2006 | M12x1.5x40 | 6 | |
| 12 | Самонарезающие винты с потайной головкой | ГОСТ 10619-80 | M8x1.0x14 | 16 | |
| 13 | Труба сварная холоднодеформированная | ГОСТ Р 54159-2010 | Ø25, длина 191, толщина 2 | 20 | Длина 191, 190.2, 189.2 мм для толщины профиля 1.5, 1.9, 2.4 мм соответственно; 16 штук в установке для профиля С150 |
| 14 | Пластина | ГОСТ 19903-2015 | 29x3x165 | 24 | |

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 9 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

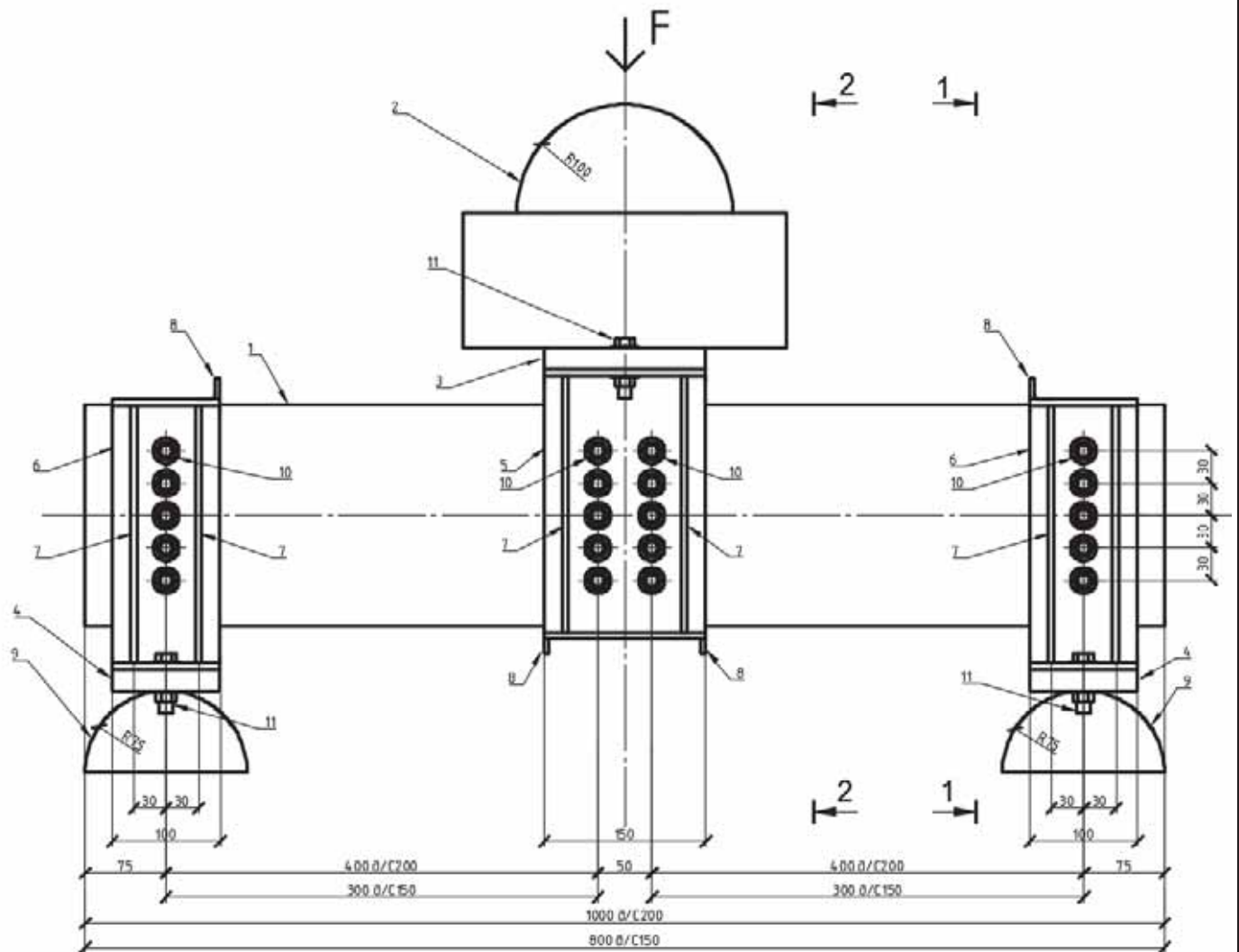


Рисунок 1.1.2 – Схема установки для С200, вид слева М 1:4

Для типоразмеров С200 и С150 применяется разная длина между центральными и крайними вертикальными рядами высокопрочных болтов: 400 мм для С200 и 300 мм для С150. Таким образом, отношение высоты профиля к этому расстоянию остается приблизительно постоянным и равным 1:2, вследствие чего разрушение происходит от поперечного изгиба в обоих случаях.

Соответственно длина секций С200 и С150 равна 1000 мм и 800 мм

Так как сечение С150 приближенно на 50 мм ниже, чем С200, его закрепляют четырьмя болтами в одном вертикальном ряду.

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

Лист

10

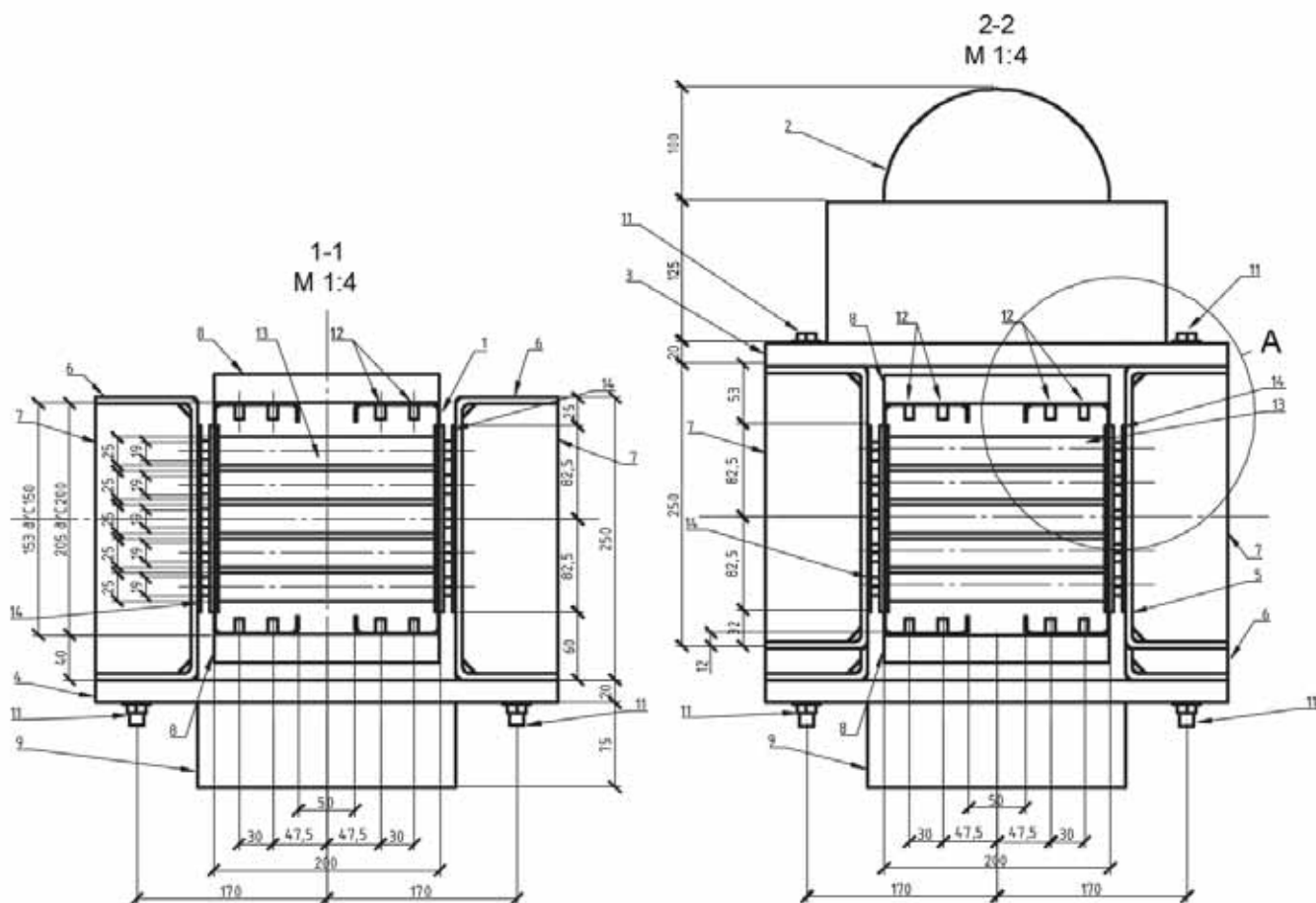


Рисунок 1.1.3 – Сечения 1-1 и 2-2 вида слева М 1:4

В ходе испытаний опорные полуцилиндры 9 и крайние опорные пластины 4 взаимодействуют друг с другом только с помощью сил реакций и трения. Достаточно большой радиус полуцилиндров в 75 мм позволяет проваливаться вышележащим экспериментальным элементам между ними. Очевидно, что этот эффект растет с увеличением длины опытных секций.

К крайним опорным пластинам 4 на болтах 11 прикреплены крайние холодногнутые С-образные сечения 6, к которым в целях обеспечения устойчивости приварены ребра жесткости 7.

Нагрузка на сечения 6 передается от высокопрочных болтов 10 с моментом закручивания 90кНм. Болты 10 проходят сварные трубы 13 насквозь, обеспечивая совместную работу испытываемых профилей 1

Между трубами 13 и профилем 1, а также профилем 1 и С-образными секциями 6 и 3 установлены горячекатаные пластины 14 в целях сохранения устойчивости стенки профиля 1 на протяжении всего эксперимента.

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | 11 |

Для удобства монтажа трубы 13 прихвачены к пластинам 14 полуавтоматической сваркой, что изображено на рисунке 1.1.4

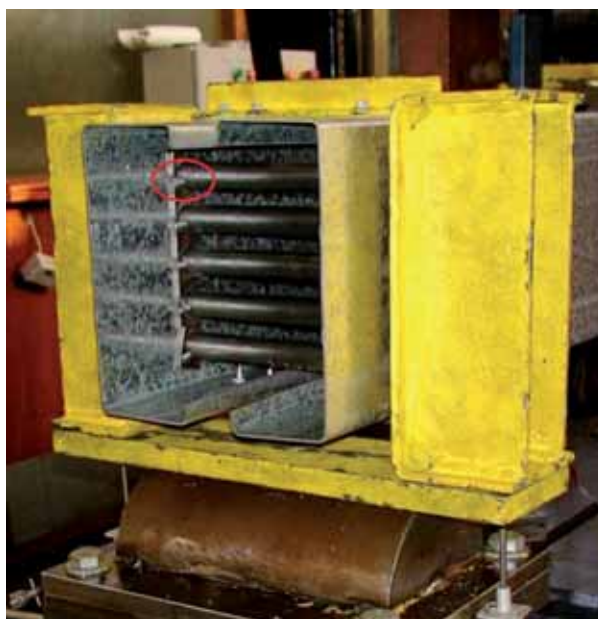


Рисунок 1.1.4 – Фотография края установки

Равнополочные уголки 8 крепятся к верхним и нижним полкам испытываемых профилей, как представлено на рисунке 1.1.4 а) при помощи самонарезающих винтов для предотвращения деформации полки в месте контакта.

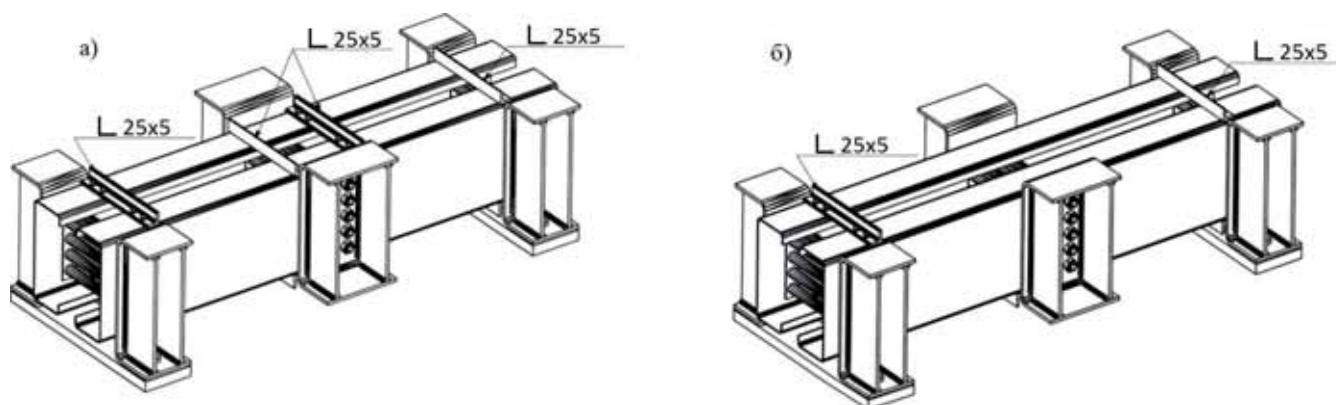


Рисунок 1.1.4 – Изометрия схемы установки без части экспериментальных приспособлений; а) Первый вариант оснастки – со срединными уголками на верхних полках профилей; б) второй вариант – без

В исследовательских целях предусмотрен дополнительный вариант оснастки, в котором отсутствуют уголки 8 на верхних полках испытываемых профилей 1 между центральными С-образными сечениями 5, что показано на рисунке 1.1.4 б)

Усилие на профили 1 передается посредством высокопрочных болтов 10 от центральных С-образных сечений 5, которые в свою очередь перенимают нагрузку через центральную опорную пластину 3 от сферического шарнира. На рисунках 1.1.2 и 1.1.3 показана только его часть, а именно оголовок сферического шарнира 2, так как его конструкция не уточнена в австралийском отчете.

В то время как приложенная к сферическому шарниру сила остается вертикальной, оголовок сферического шарнира 2, центральная опорная пластина 3 и центральные С-образные сечения 5 могут совершать сферическое движение вокруг вершины сферического шарнира. Что упрощает разрушение профилей 1 по несимметричной форме.

В качестве нагружающего устройства применяется гидравлический пресс DARTEC. Усилие прикладывается таким образом, что вертикальное перемещение датчиков ЛПДТ (линейных переменных дифференциальных трансформаторов) на центральных С-образных сечениях составляет постоянную величину на протяжении испытаний, равную 2 мм/мин

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | 13 |

1.2 Результаты испытаний гнутых профилей

Полученные в эксперименте значения разрушающей нагрузки приведены в таблице 1.2.1

Таблица 1.2.1

| № теста | Наименование | Типоразмер | s, м | P_T , кН | M_T , кНм | V_T , кН |
|---------|--------------|------------|------|------------|-------------|------------|
| 1 | MV-150-15-1 | C15015 | 0,3 | 142,96 | 10,72 | 35,74 |
| 2 | MV-150-15-2 | | | 134,11 | 10,06 | 33,53 |
| 3 | MV-150-15-3 | | | 141,8 | 10,64 | 35,45 |
| 4 | MV-150-15-4s | | | 107,19 | 8,04 | 26,8 |
| 5 | MV-150-19-1 | C15019 | | 197,35 | 14,8 | 49,34 |
| 6 | MV-150-19-2 | | | 187,89 | 14,09 | 46,97 |
| 7 | MV-150-19-3 | | | 195,22 | 14,64 | 48,8 |
| 8 | MV-150-19-4s | | | 153,64 | 11,52 | 38,41 |
| 9 | MV-150-24-1 | C15024 | | 253,82 | 19,04 | 63,45 |
| 10 | MV-150-24-2 | | | 263,03 | 19,73 | 65,76 |
| 11 | MV-150-24-3 | | | 251,07 | 18,83 | 62,77 |
| 12 | MV-150-24-4s | | | 216,7 | 16,25 | 54,18 |
| 13 | MV-200-15-1 | C20015 | 0,4 | 139,66 | 13,97 | 34,92 |
| 14 | MV-200-15-2 | | | 128,68 | 12,87 | 32,17 |
| 15 | MV-200-15-3 | | | 142,23 | 14,22 | 35,56 |
| 16 | MV-200-15-4s | | | 97 | 9,7 | 24,25 |
| 17 | MV-200-19-1 | C20019 | | 222,81 | 22,28 | 55,7 |
| 18 | MV-200-19-2 | | | 218,47 | 21,85 | 54,62 |
| 19 | MV-200-19-3 | | | 212,8 | 21,28 | 53,2 |
| 20 | MV-200-19-4s | | | 159,2 | 15,92 | 39,8 |
| 21 | MV-200-24-1 | C20024 | | 294,04 | 29,4 | 73,51 |
| 22 | MV-200-24-2 | | | 289,04 | 28,9 | 72,56 |
| 23 | MV-200-24-3 | | | 286,54 | 28,65 | 71,63 |
| 24 | MV-200-24-4s | | | 221,22 | 22,12 | 55,3 |

где s – расстояние между центральным и крайним вертикальными рядами высокопрочных болтов 10;

P_T – значение внешней сосредоточенной нагрузки, при которой оба профиля потеряли несущую способность, кН;

M_T – момент, возникающий в сечении одного профиля, расположенного на уровне центрального вертикального ряда болтов;

V_T – поперечная сила, воспринимаемая одним профилем в том же сечении, кН

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 14 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

$$M_T = 0.5 \times s \times P_T / 2 \quad (1.2.1)$$

$$V_T = 0.5 \times P_T / 2 \quad (1.2.2)$$

Для теста 1

$$M_{T1} = 0.5 \times 0,3\text{м} \times 142,96\text{кН} / 2 = 10,72 \text{ кНм}$$

$$V_{T1} = 0.5 \times 142,96\text{кН} / 2 = 35,74 \text{ кН}$$

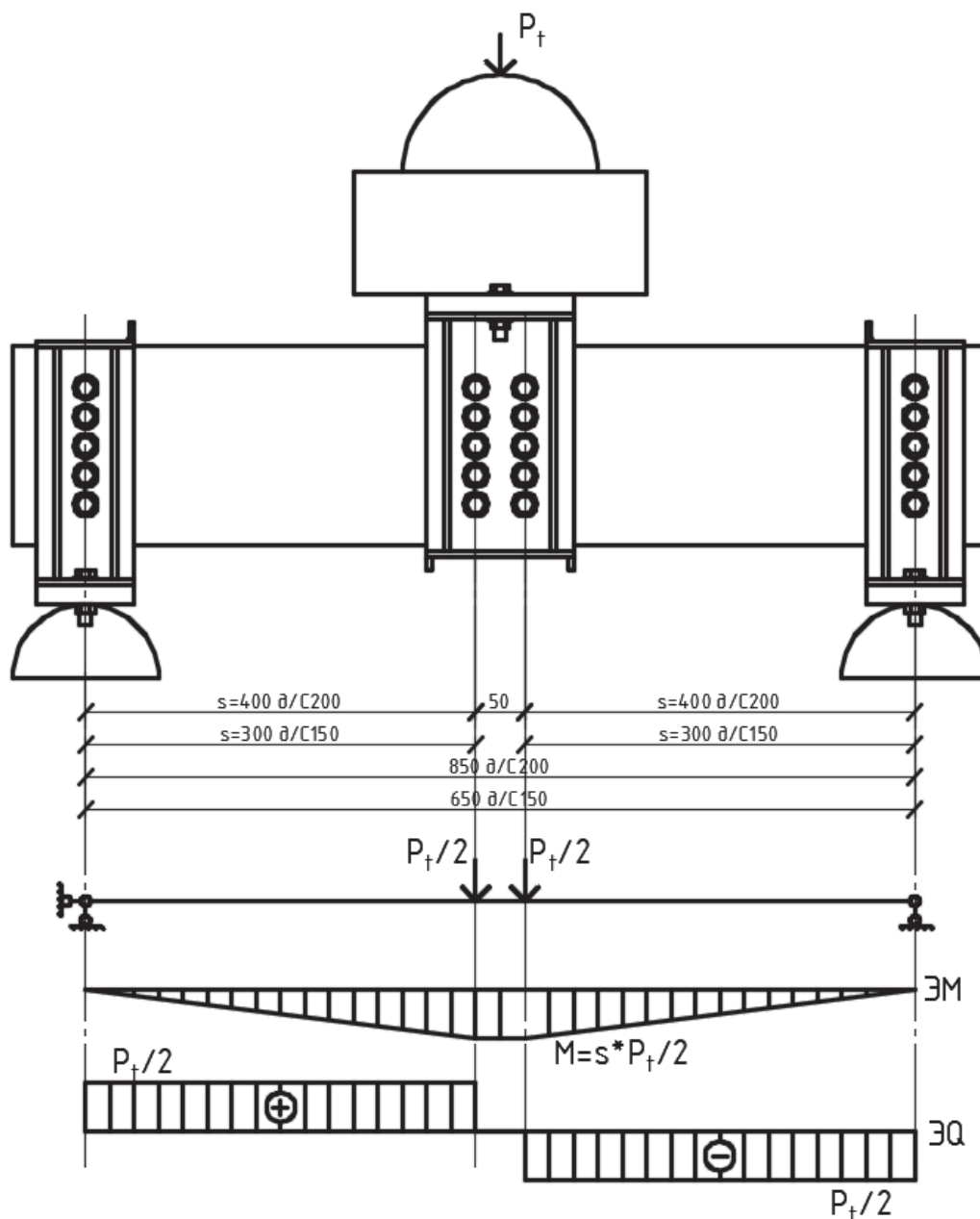


Рисунок 1.2.1 – Расчетная схема профиля

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | 15 |

2 Построение расчетных моделей испытанных гнутых профилей

| | | | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|--------------------|------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | Лист |
| | | | | | | 16 |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат | | |

2.1 Конечно элементная модель

Чтобы сократить количество КЭ и увеличить скорость решения при моделировании была использована симметрия экспериментальной установки.

Имеются две плоскости симметрии — XY и YZ (рис. 2.1.1), однако из-за того, что в опыте возможны несимметричные формы потери устойчивости и закритического деформирования профиля относительно XY, можно использовать только одну плоскость — YZ (рис.2.1.2)

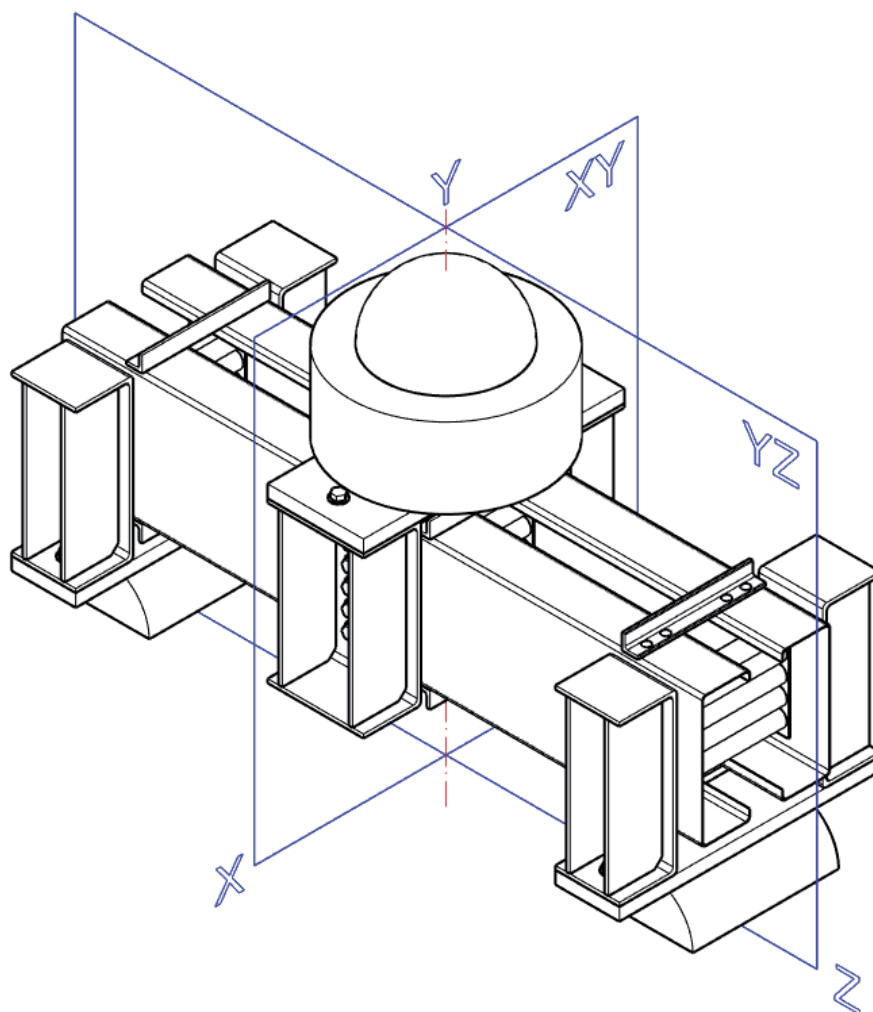


Рисунок 2.1.1 – Плоскости симметрии модели

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

Лист

17

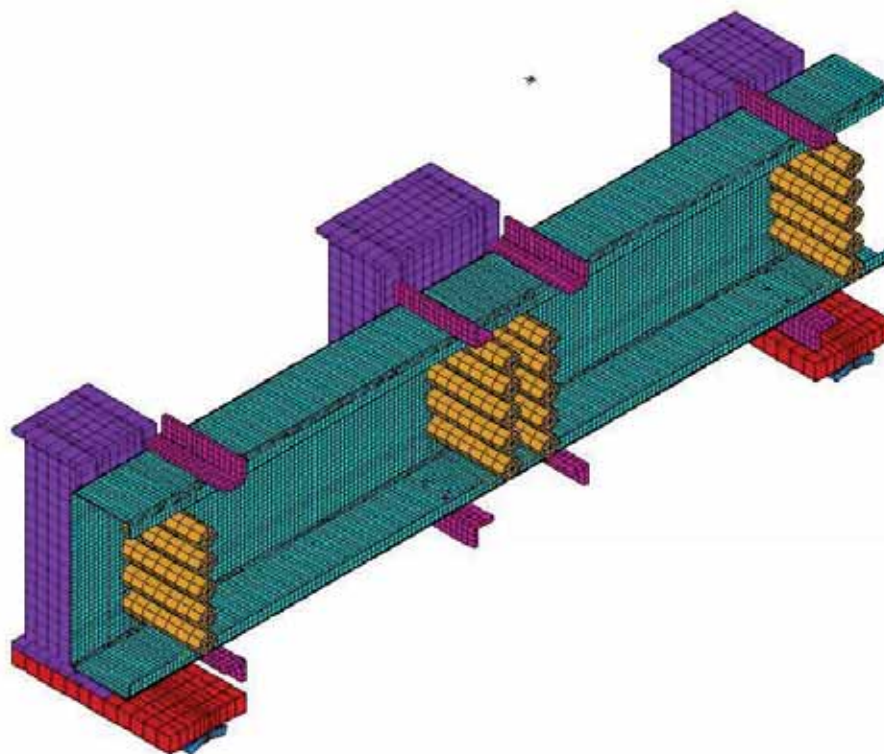
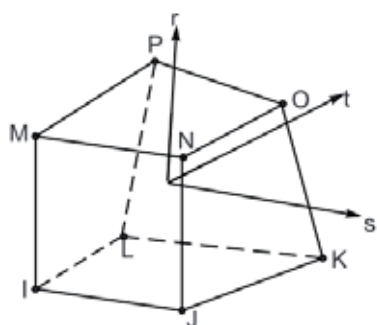
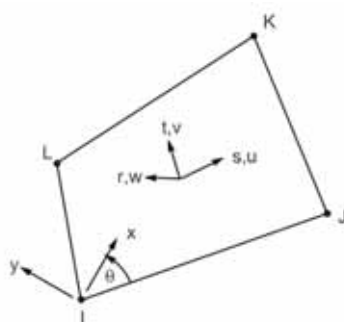


Рисунок 2.1.2 – Конечно-элементная модель.

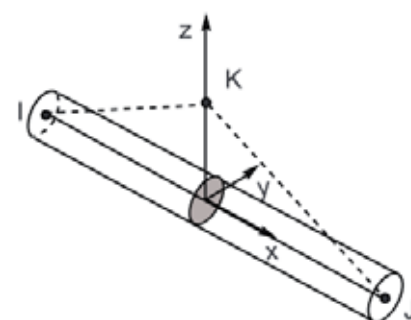
Наиболее универсальным типом конечного элемента является твердотельный (рис. 2.1.3) Однако моделировать данным типом элемента тонкостенные или вытянутые конструкции вычислительно неэффективно, так как их требуется большое количество для получения решения достаточной точности. Поэтому для моделирования тонкостенных и протяженных элементов применяют оболочные и балочные типы соответственно.



А)



Б)



В)

Рисунок 2.1.3 – Распространение типы конечных элементов в задачах механики. А) — твердотельный; б) — оболочечный; в) — балочный

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

Анализ показывает, что следующие элементы конструкции должны быть смоделированы как оболочные элементы: 1) испытываемый профиль; 2) центральный холодногнутый профиль С-образного сечения 250x90x6; 3) крайний холодногнутый профиль С-образного сечения 250x90x6; 4) ребро жесткости; 5) равнополочный уголок 25x5.

Твердотельные элементы: 1) крайняя опорная пластина; 2) Опорный полуцилиндр.

Балочные элементы: 1) высокопрочные болты 2) болты самонарезающие.

Из модели исключены: 1) оголовок сферического шарнира 2) центральная опорная пластина. Более подробно причины описаны в разделе, описывающим граничные условия модели.

Моделирование крайних опор (твердотельные элементы)

Важным для данной модели является выбор способа моделирования опор, поскольку каждый из них имеет свои достоинства и недостатки.

Первый способ (рис. 2.1.4) подразумевает моделирование шарнирного опирания по линии, при этом у узлов опорной пластины по линии опирания запрещаются перемещения по осям Y и Z . Данный прием является наиболее вычислительно выгодным, так как не создает дополнительных элементов, и также не добавляет нелинейности в систему. Однако жестко зафиксированные узлы не дают смещаться опорной пластине, а только разрешают поворот, что может существенно повлиять на точность результата.

Второй способ — задание уравнений жесткой связи таким образом, что позволяет опорной пластине поворачиваться относительно оси, проходящей через центр опорного полуцилиндра. Данный способ незначительное добавляет вычислительной жесткости, лучше предыдущего описывает реальное поведение пластины на полуцилиндре, однако не позволяет моделировать проскальзывание, а только «обкатку».

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 19 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

Третий наиболее реалистичный способ, подразумевает моделирование твердотельными элементами опорной пластины и опорного полуцилиндра и задание контактного интерфейса с трением между пластиной и цилиндром. Данный способ наиболее вычислительно затратен, добавляет дополнительную степень нелинейности в модель, но позволяет максимально реалистично смоделированные взаимодействие опоры и цилиндра. В данной работе использовано моделирование опоры этим способом. По результатам моделирования было подтверждено, что в контактном интерфейсе присутствуют одновременно как обкатка, так и проскальзывание.

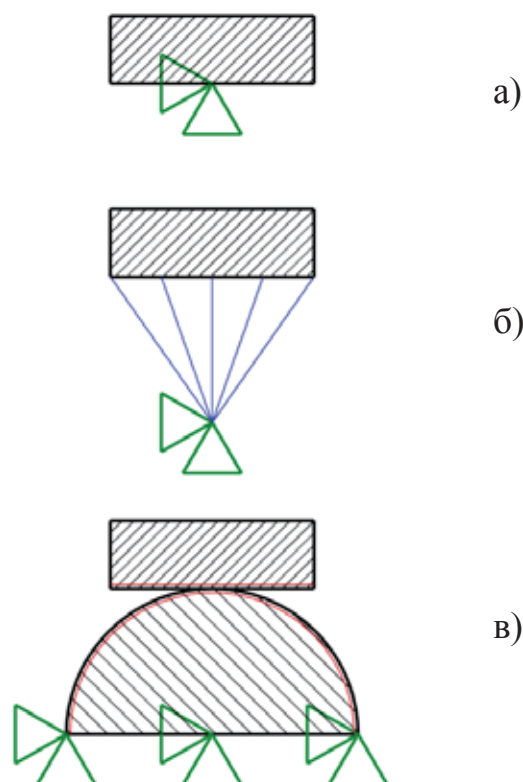
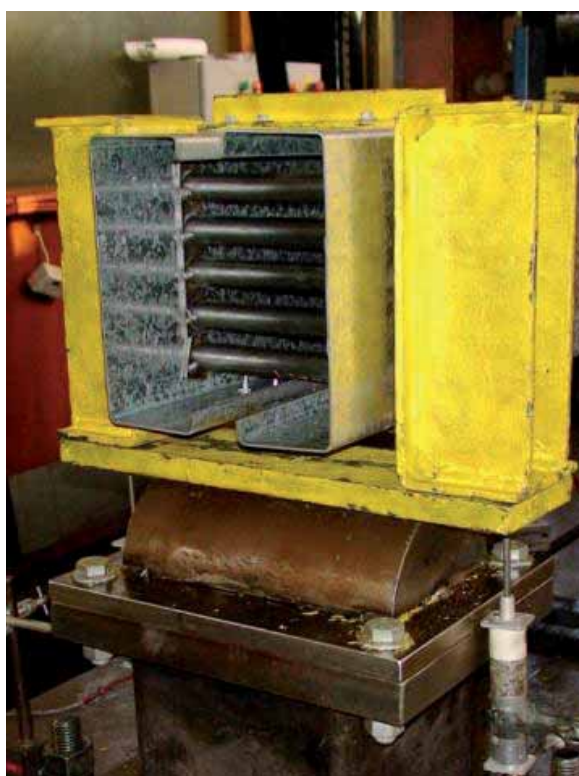


Рисунок 2.1.4 Способы моделирования крайней опоры: а) — шарнирное опирание по линии; б) — уравнения жесткой связи, вращение относительно оси опорного полуцилиндра; в) — прямое моделирование опорной пластины и опорного полуцилиндра с заданием контактной пары.

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

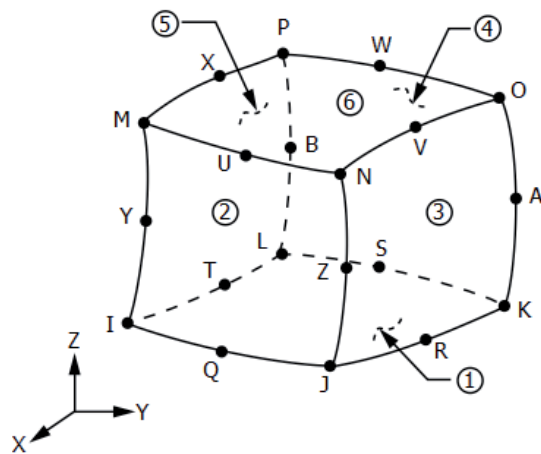
Лист

20

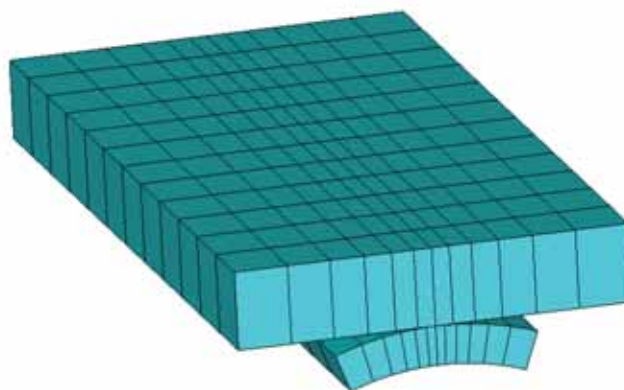
Непосредственно для моделирования пластины и полуцилиндра в системе ANSYS были использованы элементы 20-ти узловые SOLID186 (рис 2.1.5). От «классических» 8-узловых твердотельных элементов SOLID185 их отличает работоспособность в нелинейных задачах а также возможность за счет только одного элемента по толщине давать корректное решение для изгибных напряжений. Кроме того за счет параболической форм границы они лучше подходят для моделирована криволинейных поверхностей. На рисунке 2.1.5 приведена конечно-элементная сетка для моделирования одной из опор. При этом полуцилиндр заменен цилиндрическим сегментом с целью экономии вычислительных ресурсов без снижения точности решения.

Между опорной пластиной и опорным полуцилиндром заданы контактные элементы CONTA174/TARGE170, в формулировке «Standard» (KEYOPT(12) = 0), которая позволяет моделировать как свободное размыкание контакта, так и возникновение контактного давления при смыкании контактной пары, а также взаимное проскальзывание с возникновением сил трения. В качестве модели трения выбрана стандартная модель сухого трения Амонтона-Кулона, при которой сила трения пропорциональна нормальной силе, умноженной на постоянный коэффициент трения. В качестве коэффициента трения задан типовой коэффициент трения «сталь по стали» 0.2, характерный для трущихся стальных поверхностей с шероховатостью $R_a = 0.8 \dots 1.6$ мкм — чистовая механическая обработка [9].

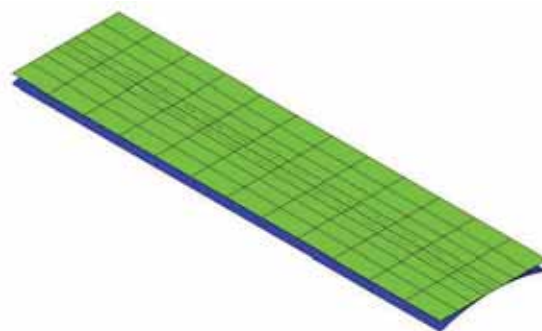
| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 21 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |



Обведенные цифры указывают грани; буквы узлы элемента



а)



б)

Рисунок 2.1.5 – Сетка конечных элементов для крайней опорной пластины и опорного полуцилиндра: а) твердотельные элементы SOLID186; б) контактные элементы CONTA174/TARGE170.

Для данной задачи был выбран контактный алгоритм «Аргумент Лагранжа» (KEYOPT(4) = 0), который развивает алгоритм штрафных функций Pure Penalty, и обеспечивает устойчивую и быструю сходимость в итерационном процессе, а также меньшую чувствительность к величине контактной жёсткости (FKN).

Контактное усилие, препятствующее взаимному прониканию в контактном интерфейсе

$$F_{\text{конт}} = FKN \cdot d + \lambda$$

где FKN — контактная жесткость, d — величина перемещения узла в контактную поверхность, λ — множитель Лагранжа, рассчитываемый по внутренним алгоритмам ANSYS.

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

Лист

22

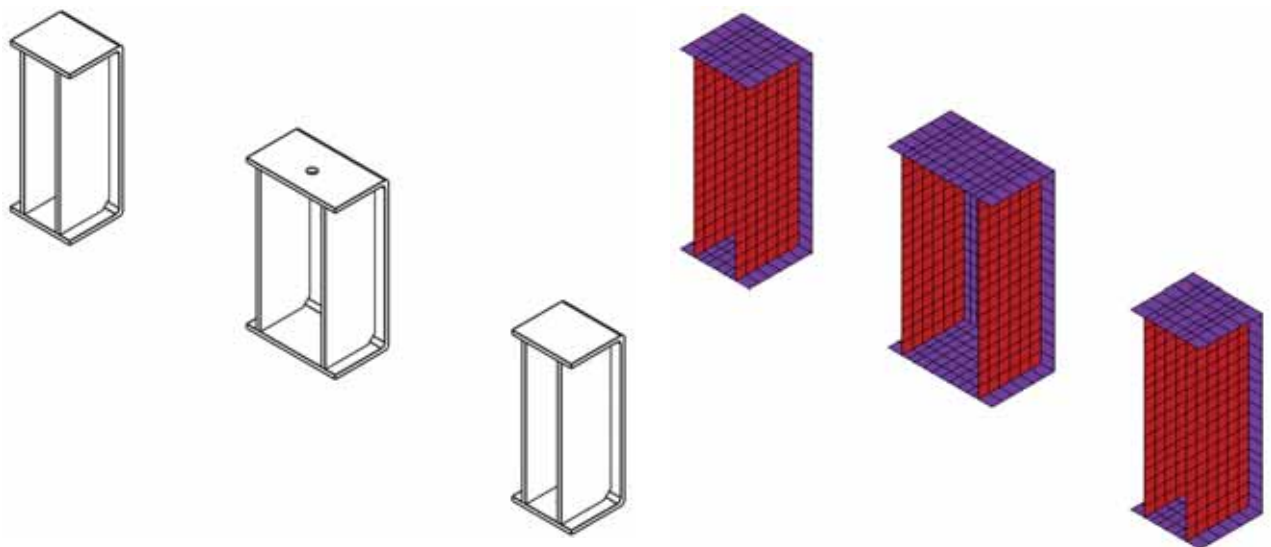
Для улучшения сводимости также выбран параметр KEYOPT(10) = 2 — автоматический подбор величины контактной жесткости на каждой итерации.

Алгоритм распознавания того, возникают ли контактные усилия, выбран «по Гауссовым точкам» как более стабильно работающий для контакта типа «поверхность-поверхность».

Необходимо чтобы все контакты начальный момент времени были «закрыты». Погрешности, обусловленные отличием сеточной модели от реальной геометрии, могут приводить к образованию зазора в контактной паре и несходимостью. Для предотвращения такой ситуации, ANSYS может автоматически подбирать величину виртуального смещения контактной поверхности так чтобы контактная пара была «замкнута». За это отвечает настройка KEYOPT(5) = 3

Моделирование центральной и крайних опор (оболочные элементы).

Данные конструктивные элементы подходят для моделирования с помощью оболочных элементов SHELL181 (рис. 2.1.6) размером 16 мм, и упругой моделью материала с модулем упругости $E = 2.069e5$ МПа, и коэффициентом Пуассона $\mu = 0.3$. Конечно-элементная сетка центральной и крайних опор приведена на рис. ... Сварка ребер жесткости и гнутых профилей моделировалась как прямое связывание через общие узлы.



Высокопрочные болты М12, сварные трубы $\varnothing 25$, пластины, гайки неподвижно закрепляют половинки опоры и испытываемый профиль друг относительно друга. Учитывая это, а также тот факт, что жесткость всех элементов намного больше жёсткости профиля, было принято допущение о моделировании всех этих элементов с помощью единого балочного элемента круглого поперечного сечения $\varnothing 25$. Данный подход позволил существенно увеличить скорость расчета. В качестве балочных элементов использовались элементы BEAM188

Для моделирования дополнительной фиксации профиля с помощью пластин было применено связывание элементов через MPC контакт. Такой подход также позволяет получить достаточно точное решение без чрезмерного увеличения количества элементов и усложнения задачи. Все контактные MPC-интерфейсы в задаче приведены на рис. 2.1.8

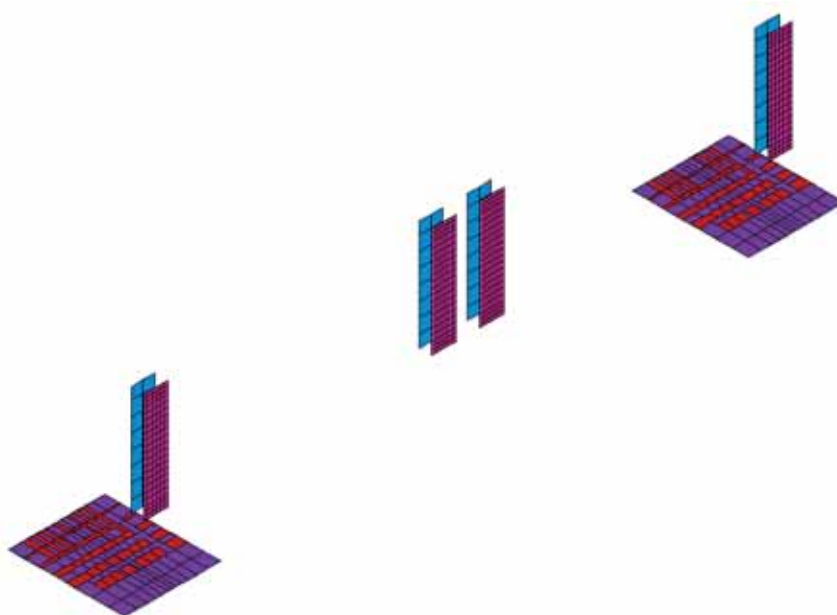


Рисунок – 2.1.8 Контактные интерфейсы типа MPC в модели

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 25 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

Для ряда расчетных вариантов возможно такое закритическое деформирование профиля, что загиб профиля («губа») провалиться и коснется стягивающих болтов. В этом случае нужно учитывать контактное взаимодействие между балочными элементами, моделирующими болты, и краем оболочки. Для этого был использован специальный вид контактных элементов CONTA177/TARGE170, с опцией KEYOPT(3) = 2. В этом случае край оболочки рассматривается как балка.

Моделирование уголков

Модель также включает вспомогательные равносторонние уголки, служащие для предотвращения деформации потери устойчивости профиля при испытаниях.

Для моделирования уголков были применены оболочные элементы SHELL181. Каждый уголок фиксируется с помощью 4 самонарезающих болтов, которые были смоделированы как элементы BEAM188. Между полотном профиля и уголком задан контактный интерфейс CONTA174/TARGE170 с настройками, аналогичными настройками контактного интерфейса между опорной пластиной и опорным полуцилиндром: аргумент Лагранжа/ по Гауссовым точкам/.

Моделирование полотна профиля

Профиль является тонкостенным, и был смоделирован с помощью оболочечных элементов SHELL181. Настройки элемента были выбраны:

KEYOPT(3) = 2 Данная опция делает элемент полно интегрируемым и более точным в расчете мембранных напряжений, что должно сделать его более точным в данном расчете, так как присутствуют не только изгибные, но и значительная доля мембранных напряжений;

KEYOPT(5) = 1 Данная опция также должна повысить точность расчета после внесения начальных несовершенств.

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 26 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

В качестве размера элемента был выбран 6 мм. Для создания сетки на закруглениях сделано по 4 элемента на дугу 90°.

Задание модели материала

Профиль в процессе нагружения испытывает существенные пластические деформации, особенно при моделировании закритического поведения после потери устойчивости. В данном случае была использована модель пластичности мульти-линейное изотропное упрочнение (multi-linear isotropic hardening, MISO).

Исходные кривые в инженерных напряжениях/деформациях были взяты из отчета [11]. Данные кривые являются зашумленными, а также содержат ниспадающие участки, что недопустимо в ANSYS Mechanical. Кроме того, в системе ANSYS кривые деформирования должны быть заданы в виде графика «истинные пластические деформации — истинные напряжения», поэтому исходные кривые были обработаны в следующем порядке:

- 1) Переход к значениям истинных напряжений и деформаций

$$\sigma_{\text{ист}} = \sigma_{\text{инж}}(1 + \varepsilon_{\text{инж}}) \quad (2.1.1)$$

$$\varepsilon_{\text{ист}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{инж}}) \quad (2.1.2)$$

- 2) Аппроксимация кривой “истинные деформации / истинные напряжения” функцией вида:

$$\varepsilon_{\text{ист}} = \begin{cases} \frac{\sigma_{\text{ист}}}{D}, & \text{при } \sigma_{\text{ист}} \leq A \\ \frac{\sigma_{\text{ист}}}{D} + \frac{1}{C} \tan\left(\frac{\sigma_{\text{ист}}}{B} - A\right), & \text{при } \sigma_{\text{ист}} > A \end{cases} \quad (2.1.3)$$

Функция получена из соображения, что пластические деформации можно попробовать приблизить к зависимости вида

$$\sigma_{\text{true}} = A + B \operatorname{atan}(C\varepsilon_{\text{plas}}) \text{ и } \varepsilon_{\text{true}} = \varepsilon_{\text{elas}} + \varepsilon_{\text{plas}} \text{ и } \varepsilon_{\text{elas}} = \frac{\sigma_{\text{true}}}{E}$$

Где A, B, C, D – неизвестные константы; при этом A является пределом пропорциональности, D модулем упругости.

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 27 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

Поиск этих четырех параметров проведем с помощью процедуры нелинейной регрессии методом наименьших квадратов. Суть заключается в поиске таких параметров функции, чтобы сумма квадратов разностей между экспериментальными значениями и значениями функции была наименьшей.

Такую процедуру можно провести с помощью функции «nlinfit» в программе Matlab «nlinfit». В результате получаются все 4 параметра функции, наилучшим образом аппроксимирующей экспериментальные данные.

- 3) Получение точек напряжений, деформаций, пластической деформации, согласно аналитической функции
- 4) Сокращение количества точек до 11 для задания зависимости $\varepsilon_{plas} / \sigma_{true}$ в ANSYS, так как использование большого числа точек в модели материала MISO не уточняет решение, лишь увеличивая время ожидания

Результаты аппроксимации приведены в графической части.

| | | | | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Типоразмер | C15015 | C15019 | C15024 | C20015 | C20019 | C20024 |
| E, Мпа | 217507 | 207460 | 193128 | 190546 | 193933 | 204174 |

2.2 Выбор размера конечных элементов

При уменьшении размера конечного элемента повышается точность решения, но при этом сильно растут вычислительные затраты.

Для выбора оптимального размера конечного элемента был проведен ряд расчетов деформирования профиля с заданием размера конечного элемента 5, 6, 8, 10 и 12 мм. Также контролировалось время выполнения.

На рисунках 2.2.1 и 2.2.2 отображено, что при уменьшении размера конечного элемента максимальная нагрузка немного уменьшается, но при этом ощутимо увеличивается время расчета.

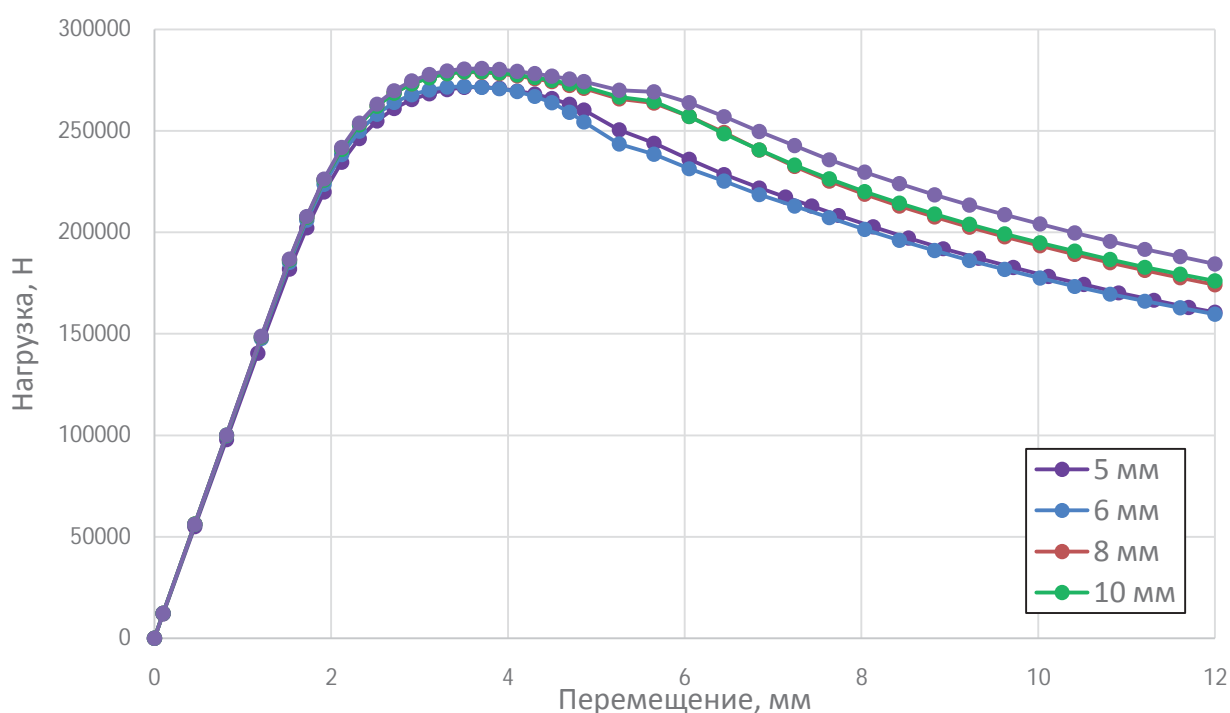


Рис. 2.2.1 - Сравнение зависимостей «нагрузка—перемещение» для профиля MV-C15024-1, выполненных с разным размером конечного элемента.

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

Лист

29

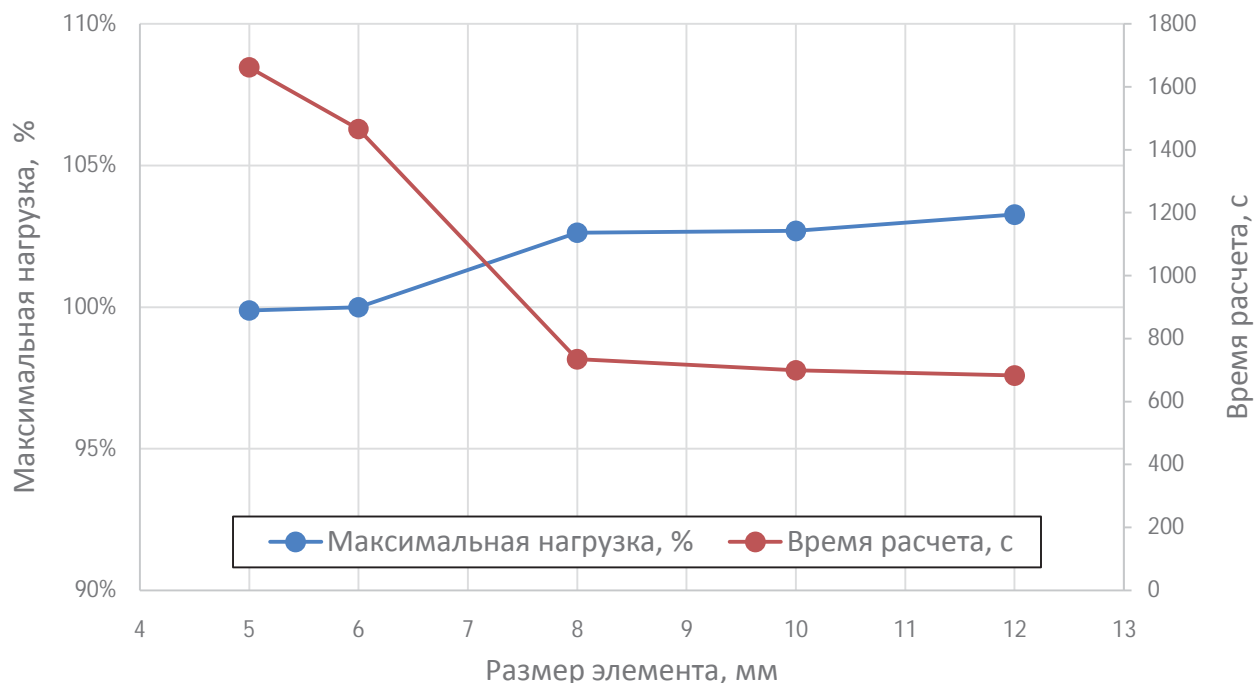


Рисунок 2.2.2 Сравнение максимальной нагрузки и времени расчета моделей профиля MV-C15024-1 для разного размера конечного элемента.

2.3 Типы конечных элементов

Таблица 2.3.1 – Сводная таблица конечных элементов

| Поз. | Наименование | Оболочковый | Балочный | Твердотельный | Контактные | |
|------|---|-------------|----------|---------------|----------------------------------|-------------------|
| | | | | | Тип | Контактная пара с |
| 1 | Испытываемый профиль | SHELL181 | | | TARGE170 CONTA174 CONTA177 | 8 5,6 10 |
| 4 | Крайняя опорная пластина | | | SOLID186 | TARGE170 | 9, 6 |
| 5 | Центральный холодногнутый профиль С-образного сечения | SHELL181 | | | TARGE170 | 1 |
| 6 | Крайний холодногнутый профиль С-образного сечения | SHELL181 | | | CONTA174 TARGE170 | 4 1 |

| | | | | | | |
|----|---|----------|---------|----------|----------|---|
| 7 | Ребро жесткости | SHELL181 | | | | |
| 8 | Равнополочный уголок 25x5 | SHELL181 | | | CONTA174 | 1 |
| 9 | Опорный полуцилиндр | | | SOLID186 | CONTA174 | 4 |
| 10 | Болты высокопрочные | | BEAM188 | | TARGE170 | 1 |
| 12 | Само-нарезающие винты с потайной головкой | | BEAM188 | | | |

Подробное описание применения каждого из типов элемента, а также их опций в соответствующем случае приведено в предыдущем подпункте.

2.4 Граничные условия

В модели присутствует несколько типов граничных условий: симметрии, закрепления опор, и нагружение конструкции.

Для обеспечения условий симметрии все узлы, лежащие на плоскости симметрии (YZ) получали ограничение по перемещению в направлении нормали плоскости симметрии — UX, а также два угла поворота относительно двух других осей — ROTY, ROTZ.

Для обеспечения неподвижности опорных полуцилиндров на нижней части элементов, моделирующих полуцилиндры, запрещение трех перемещений UX, UY, UZ.

Способ нагружения позволяет поворот относительно верха оголовка сферического шарнира, который является достаточно жестким. С учетом этого было принято решение заменить сферический шарнир и центральную опорную плиту на уравнения жестких связей, а нагружение осуществлять через мастер-узел. Мастер узел при этом расположен на верхушке оголовка сферического шарнира, а зависимые узлы расположены на верхней части центральной опоры. Реализовано это также посредством создания контактных элементов CONTA174/TARGE170 в MPC. Уравнения жесткой связи между мастер-узлом и зависимыми узлами ANSYS создает автоматически в процессе

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 31 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

решения. При этом для мастер-узла запрещены все степени свободы кроме перемещения U_Y (вдоль направления нагружения) и поворота относительно оси X . Зависимые узлы могут перемещаться как жесткое целое по вертикали либо поворачиваться около мастер-узла.

Нагружение осуществлялось с помощью задания перемещения мастер-узла. В качестве нагрузки выбраны именно перемещения, поскольку известно, что при таком типе нагружения задачи лучше сходятся.

Для построения диаграммы «перемещение/нагрузка» по результатам ращения измерялась реакция опоры в мастер-узле.

Схема нагружения через мастер-узел на рисунке 2.4.1

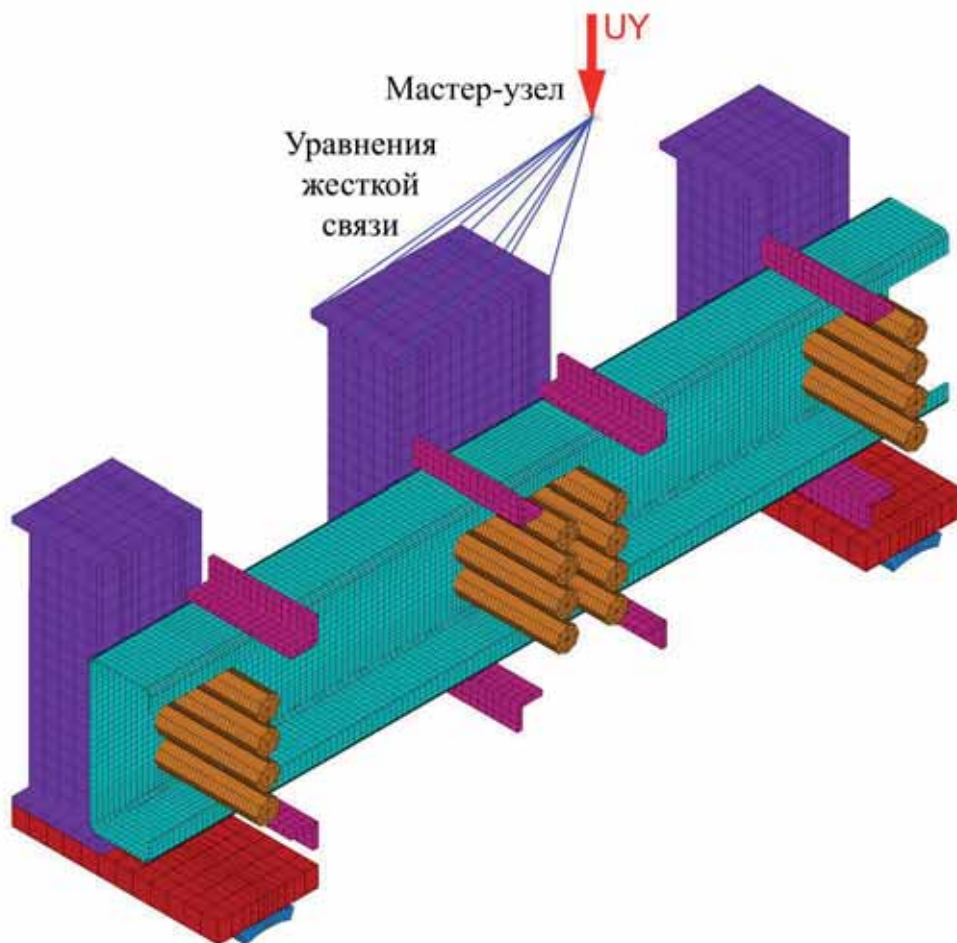


Рисунок 2.4.1 Схема нагружения установки через мастер-узел и уравнения жёсткой связи

2.5 Влияние начальных несовершенств

Процесс потери устойчивости в реальных условиях является по сути случайным процессом, который очень чувствителен к начальным условиям и несовершенствам. Поэтому многие исследователи предпринимают попытки классифицировать и оценить начальные несовершенства присущие тонкостенным профилям.

Их можно классифицировать по нескольким основным категориям

- 1) Глобальные несовершенства формы сечения профиля (рис. 2.5.1)
- 2) Локальные несовершенства, распределенные по плоскости ребра и полок профиля (рис. 2.5.2)
- 3) Остаточные напряжения, изгибные и мембранные, связанные с технологией изготовления профиля (горячая/холодная прокатка/формовка), что показано на рисунках 2.5.3-2.5.4

Изменение предела текучести материала профиля из-за наклепа (...)

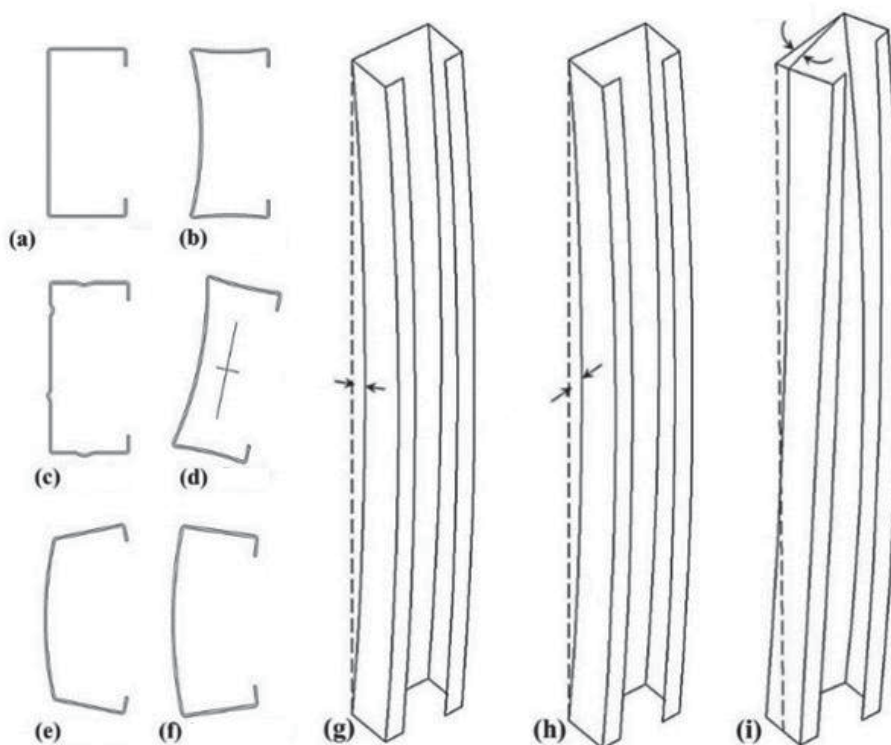


Рисунок 2.5.1 - Начальные искажения геометрии формы профиля: а) идеальное сечение; б) «корона»; в) вмятины; д) кручение; е) раскрытие; ф) перегиб; г) изгиб; г) прогиб; и) скручивание согласно [12]

Типоразмер : А 203 x 1.91 mm
(8" x 0.075")

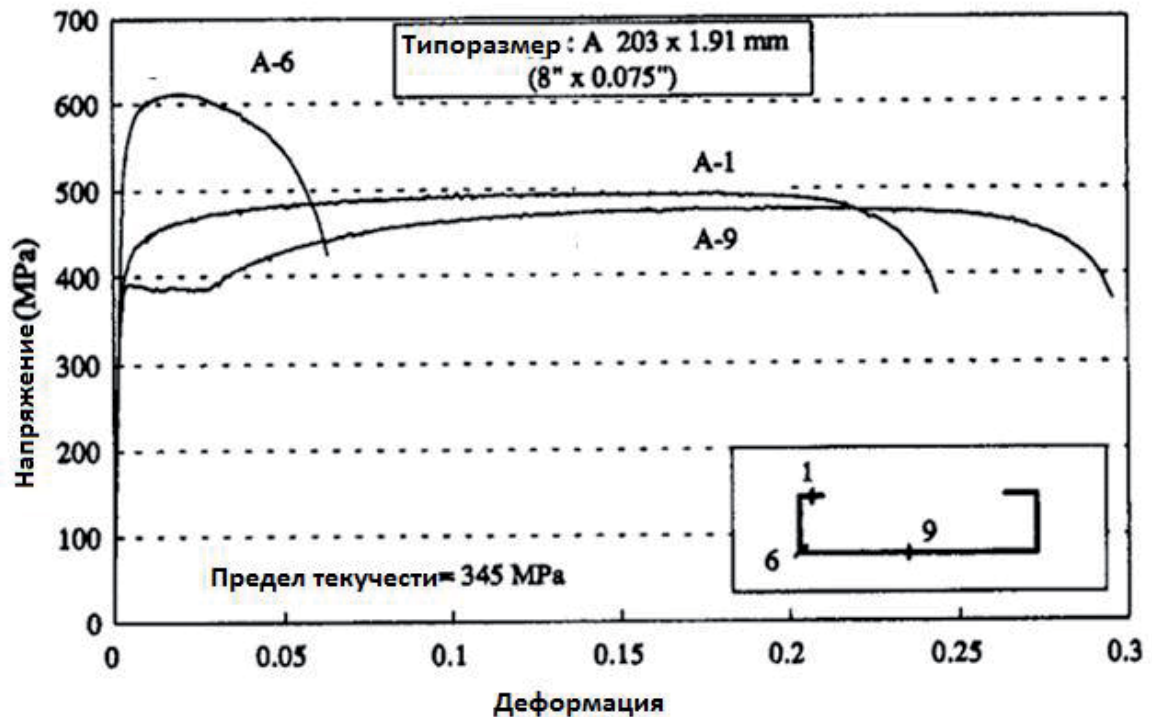
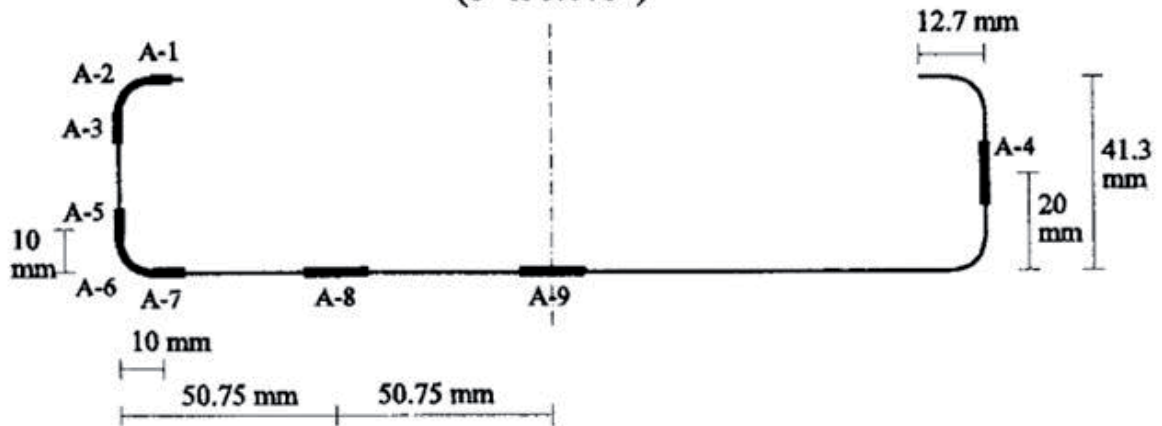


Рисунок 2.5.4 Различие диаграмм деформирования материала по сечению С-образного холоднокатаного профиля

Отдельно важным является вопрос, как учитывать начальные искажения при расчете. Стандарт Евросоюза по проектированию стальных конструкций [15] указывает, что необходимо учитывать все несовершенства, возможные на практике. В. Schafer [11], G. Zagari [16] утверждают, что наиболее полный и правильный подход по учету начальных несовершенств заключается в многовариантном анализе конструкции, при этом все возможные начальные несовершенства должны быть заданы функциями распределения, характерными для данного класса конструкций. Этот подход крайне

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

вычислительно затратен, поэтому многие исследователи проводят расчет используя допущения.

Одним из популярных упрощенных способов, позволяющий учесть начальные несовершенства, заключается в задании несовершенств по одной из форм потери устойчивости, примененный в работах [5], [11], [17].

При этом множитель существенно варьируется от $0.1t$ до $0.006w$ или $2t$ (где t и w — высота и толщина профиля соответственно).

Было принято решение проводить расчет по формам потери устойчивости со значениями множителей из отчета об эксперименте [11], на основе которого и выполнялась настоящая работа, $\pm 0.15t$ и $\pm 0.64t$

2.6 Этапы расчета

Каждый расчет нагружения профиля проводился в четыре основных этапа.

Этап 1

Необходим для формирования матрицы жесткости конструкции, а также определения статуса нелинейных элементов (контактных). Расчет производился при приложении небольшой пробной нагрузки (0.1 мм) и является нелинейным, поэтому производился в итерационном режиме. По результатам данного расчета сохраняется матрица жёсткости конструкции, а также все необходимые файлы для последующего расчета на устойчивость.

Этап 2

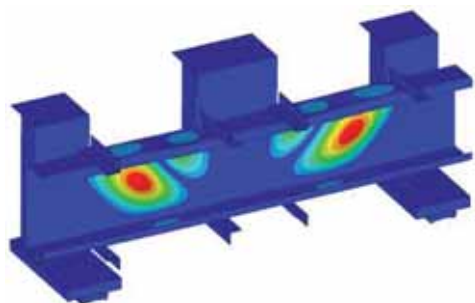
В данной задаче расчет нагрузок и форм потери устойчивости производился с помощью Linear Perturbation (процедура линейных возмущений), чтобы точно учесть нелинейные эффекты в конструкции.

Анализ форм потери устойчивости показывает, что четыре первые нагрузки потери устойчивости имеют близкие значения, формы представляют чередование похожих по форме симметричных и асимметричных искривлений, что говорит о том, что все они могут равновероятно появиться в

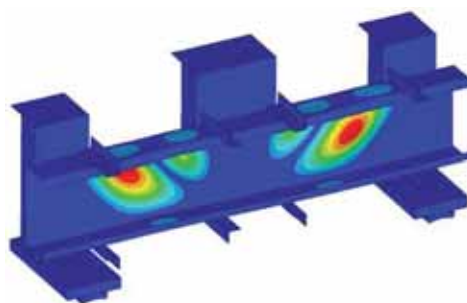
| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 36 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

эксперименте, и, следовательно, нужно использовать все из них как прообраз начальных несовершенств.

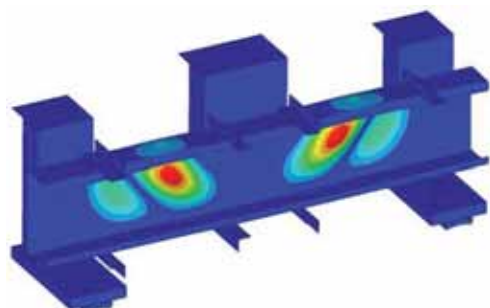
На рисунке 2.9.1 показаны первые четыре форм потери устойчивости профиля MV-15015 и MV-15015w.



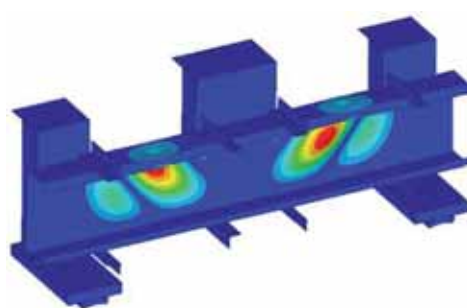
MV-15015-1, Форма 1



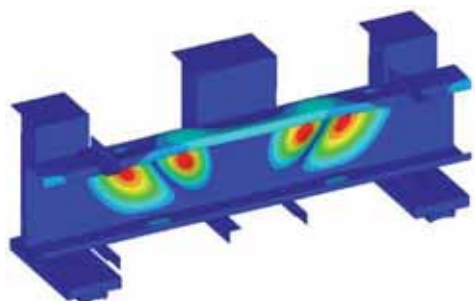
MV-15015-1, Форма 2



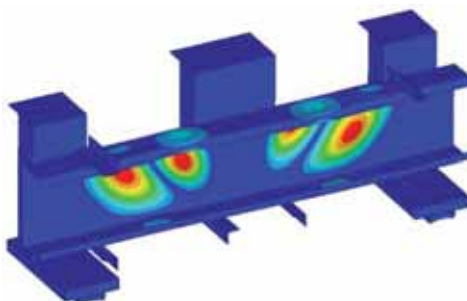
MV-15015-1, Форма 3



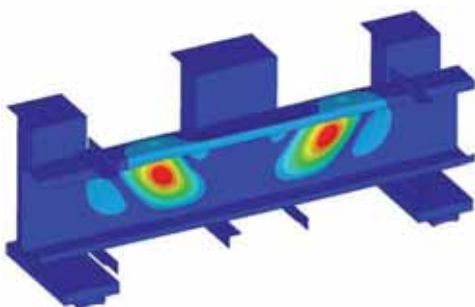
MV-15015-1, Форма 4



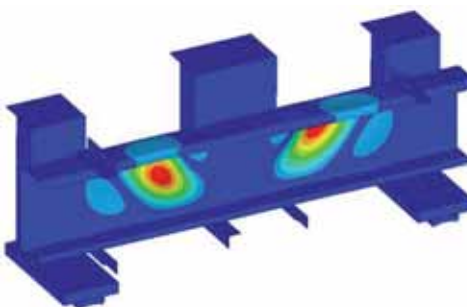
MV-15015w, Форма 1



MV-15015w, Форма 2



MV-15015w, Форма 3



MV-15015w, Форма 4

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | 37 |

Рисунок 2.9.1 – Первые четыре формы потери устойчивости профилей MV-15015-1 и MV-15015-4w. Цветом показано перемещение из плоскости профиля – от красного к синего деформации уменьшаются.

Этап 3

Суть третьего этапа заключается в создании геометрических начальных несовершенств в конструкции. Для этого применяется команда UPGEOM, которая смещает узлы согласно результатам расчета на устойчивость с заданным коэффициентом. При этом напряжения не возникают

Этап 4

Четвертый этап является основным этапом нагружения конструкции, в результате которого получается максимальная нагрузка, которую может выдерживать профиль при поперечном нагружении. Решение происходит итеративно, по алгоритму Ньютона-Рафсона. Основной шаг нагружения разбивается на подшаги, на каждом из которых ANSYS ищет баланс внешних и внутренних сил в модели за счет уравнивающих итераций. Для шага нагружения был задан начальный, максимальный и минимальный шаг по времени, а также настройка (AUTOTS,ON), позволяющая ANSYS самому подбирать шаг решения в зависимости от сходимости задачи.

Так как в процессе решения присутствуют как местная, так и общая потеря устойчивости профиля, то необходимо применять механизм стабилизационного демпфирования (STABILIZE).

Настоящий вычислительный прием прикладывает к «вылетающим» элементам конструкции искусственные демпфирующие силы, пропорциональные доле энергии элемента, к которому прикладываются данные силы.

Для расчета был выбран коэффициент диссипации 0,001 что минимально отражается на точности решения.

Для удобства и повышения управляемости процессом, общее нагружение было разбито на три основных шага:

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 38 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

- 1) подготовительное нагружение
- 2) нагружение в районе потери устойчивости и достижения максимума по нагрузке
- 3) закритическое нагружение.

Такой способ организации расчета позволяет задать особые условия (шаг, демпфирование) на подшагах потери устойчивости, а также на подшагах закритического деформирования.

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 39 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

3 Верификация конечно элементных моделей

| | | | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|--------------------|------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | Лист |
| | | | | | | 40 |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат | | |

Самая первая модель (рис 3.1) имела множество недостатков, среди них наиболее значимыми являются

- 1) Моделирование конструкции закрепления одними только BEAM188 без использования контакта, что позволяло изгибаться стенке профиля;
- 2) Закрепление элементов болтов BEAM188 между профилем и холодногнутыми С-образными сечениями по концам, что выдавало ошибку «zero pivot», вообще не позволяющую проводить расчет

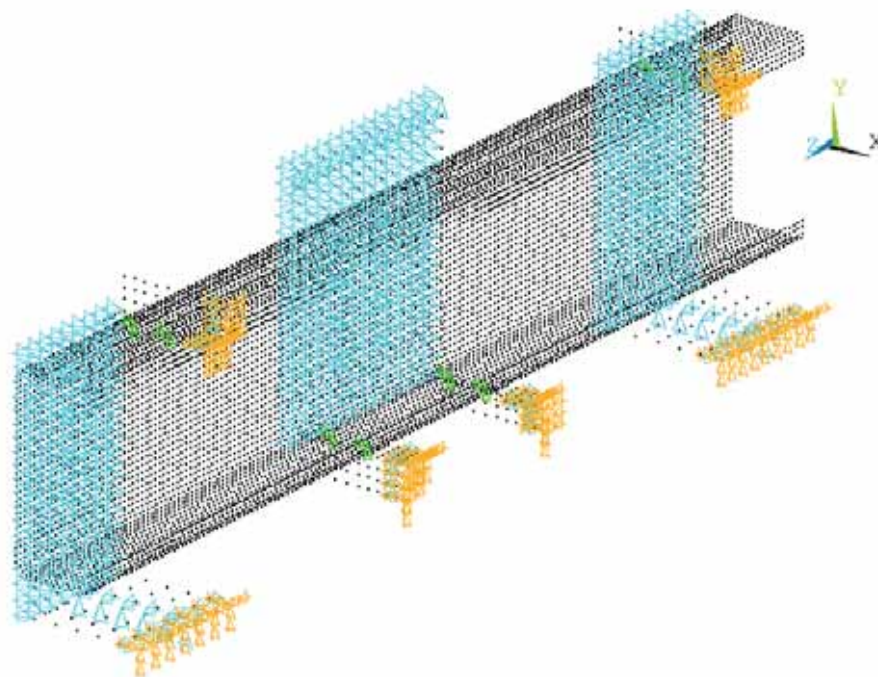


Рисунок 3.1 – Первая модель. Черными точками показаны узлы конечных элементов; Синими и оранжевыми треугольниками запрет перемещений и поворотов узлов соответственно; Зеленые треугольники отображают связывание перемещений.

Данная модель изменялась в следующем порядке

- 1) Устранена ошибка «zero pivot»;
- 2) Продлены стягивающие высокопрочные болты до плоскости оси симметрии YZ, а так же откорректирована геометрия модели до соответствия эксперименту;
- 3) Проведено приложение нагрузки через мастер-узел, находящийся на верхушке оголовка сферического шарнира, соединенный с абсолютно

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 41 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

твердыми элементами MP184-BEAM. Которые другим концом прикрепленных к центральной опорной плите и могли вращаться в плоскости YZ относительно мастер-узла. Тем самым способствуя несимметричному разрушению. Таким же образом была смоделирована обкатка крайних опорных пластин вокруг опорных полуцилиндров;

- 4) Из предупреждений ANSYS выяснилось, что такой способ может привести к тому, что одни ограничения будут неправильно работать совместно с другими; и задача не будет сходиться, поэтому в данном случае от MP184 пришлось отказаться;

Окончательная модель описана в подпункте 2.1

3.1 Сравнение результатов моделирования с результатами испытаний

Для верификации построенной модели были проведены расчеты, в которых начальные несовершенства моделировались по первым четырем формам потери устойчивости, с коэффициентами $\pm 0,15t$ и $\pm 0,64t$. Результаты моделирования проведены на рисунках 3.1.1–3.1.12 и таблицах 3.1.1–3.1.4 Также рисунки изображают сравнение форм деформирования для профилей MV-C20019 и MV-C20019-4w.

Таблица 3.1.1 Максимальная нагрузка испытываемых профилей для первой формы потери устойчивости $m1$, кН

| Наименование | Тест | 0 | m1 0.15t | m1 0.64t | m1 -0.15t | m1 -0.64t |
|--------------|--------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| MV-150-15-1 | 142.96 | 162.56 | 158.92 | 154.73 | 149.57 | 152.58 |
| MV-150-15-2 | 134.11 | 163.10 | 158.96 | 154.91 | 149.96 | 152.81 |
| MV-150-15-3 | 141.8 | 162.92 | 158.70 | 154.70 | 149.85 | 152.63 |
| MV-150-15-4s | 107.19 | 113.97 | 114.55 | 111.73 | 114.30 | 118.60 |
| MV-150-19-1 | 197.35 | 234.31 | 227.77 | 213.27 | 227.77 | 213.27 |
| MV-150-19-2 | 187.89 | 234.31 | 227.55 | 212.97 | 227.55 | 212.97 |
| MV-150-19-3 | 195.22 | 233.93 | 226.93 | 212.27 | 226.93 | 212.27 |
| MV-150-19-4s | 153.64 | 166.30 | 168.47 | 173.77 | 166.91 | 163.28 |
| MV-150-24-1 | 253.82 | 279.57 | 279.53 | 269.94 | 279.53 | 269.94 |
| MV-150-24-2 | 263.03 | 278.92 | 278.93 | 269.47 | 278.93 | 269.47 |
| MV-150-24-3 | 251.07 | 283.81 | 284.09 | 275.21 | 284.10 | 269.41 |
| MV-150-24-4s | 216.7 | 228.34 | 227.78 | 224.77 | 227.78 | 224.77 |
| MV-200-15-1 | 139.66 | 161.85 | 150.00 | 147.48 | 150.00 | 147.48 |

| Наименование | Тест | 0 | m1 0.15t | m1 0.64t | m1 -0.15t | m1 -0.64t |
|--------------|--------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| MV-200-15-3 | 142.23 | 159.50 | 147.42 | 146.34 | 147.42 | 146.34 |
| MV-200-15-4s | 97.00 | 108.10 | 108.87 | 110.81 | 107.59 | 112.32 |
| MV-200-19-1 | 222.81 | 231.67 | 228.85 | 222.59 | 228.85 | 222.59 |
| MV-200-19-2 | 218.47 | 231.48 | 228.69 | 222.39 | 228.69 | 222.39 |
| MV-200-19-3 | 212.8 | 233.93 | 226.93 | 224.82 | 226.93 | 224.82 |
| MV-200-19-4s | 159.2 | 159.17 | 159.47 | 161.14 | 159.82 | 165.75 |
| MV-200-24-1 | 294.04 | 325.75 | 315.42 | 301.53 | 315.42 | 301.53 |
| MV-200-24-2 | 289.04 | 326.43 | 316.91 | 303.09 | 316.91 | 303.09 |
| MV-200-24-3 | 286.54 | 323.44 | 316.64 | 302.79 | 316.64 | 302.79 |
| MV-200-24-4s | 221.22 | 225.06 | 224.69 | 221.82 | 228.09 | 233.48 |

Таблица 3.1.2 Максимальная нагрузка испытываемых профилей для второй формы потери устойчивости m2, кН

| Наименование | Тест | 0 | m2 0.15t | m2 0.64t | m2 -0.15t | m2 -0.64t |
|--------------|--------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| MV-150-15-1 | 142.96 | 162.56 | 155.90 | 152.62 | 155.90 | 155.60 |
| MV-150-15-2 | 134.11 | 163.10 | 150.00 | 153.06 | 157.88 | 153.06 |
| MV-150-15-3 | 141.8 | 162.92 | 157.76 | 152.93 | 157.76 | 152.93 |
| MV-150-15-4s | 107.19 | 113.97 | 114.38 | 115.06 | 114.38 | 115.06 |
| MV-150-19-1 | 197.35 | 234.31 | 229.30 | 221.81 | 224.04 | 214.19 |
| MV-150-19-2 | 187.89 | 234.31 | 229.06 | 221.45 | 224.07 | 214.07 |
| MV-150-19-3 | 195.22 | 233.93 | 228.49 | 220.89 | 223.68 | 215.88 |
| MV-150-19-4s | 153.64 | 166.30 | 167.40 | 168.28 | 167.40 | 168.28 |
| MV-150-24-1 | 253.82 | 279.57 | 278.83 | 276.32 | 279.68 | 269.14 |
| MV-150-24-2 | 263.03 | 278.92 | 278.73 | 275.72 | 279.02 | 268.89 |
| MV-150-24-3 | 251.07 | 283.81 | 283.89 | 279.99 | 283.89 | 273.22 |
| MV-150-24-4s | 216.7 | 228.34 | 229.28 | 228.71 | 224.25 | 220.16 |
| MV-200-15-1 | 139.66 | 161.85 | 156.53 | 154.37 | 148.58 | 146.27 |
| MV-200-15-2 | 128.68 | 161.83 | 156.37 | 153.19 | 148.57 | 146.28 |
| MV-200-15-3 | 142.23 | 159.50 | 154.00 | 152.19 | 148.16 | 145.55 |
| MV-200-15-4s | 97.00 | 108.10 | 107.63 | 111.05 | 107.63 | 111.05 |
| MV-200-19-1 | 222.81 | 231.67 | 234.25 | 226.37 | 228.79 | 221.41 |
| MV-200-19-2 | 218.47 | 231.48 | 234.11 | 226.20 | 228.60 | 221.19 |
| MV-200-19-3 | 212.8 | 233.93 | 239.27 | 234.85 | 229.25 | 222.74 |
| MV-200-19-4s | 159.2 | 159.17 | 159.70 | 161.72 | 159.70 | 161.72 |
| MV-200-24-1 | 294.04 | 325.75 | 327.93 | 313.29 | 312.68 | 299.46 |
| MV-200-24-2 | 289.04 | 326.43 | 325.42 | 314.58 | 314.45 | 301.57 |
| MV-200-24-3 | 286.54 | 323.44 | 325.10 | 314.25 | 314.16 | 298.75 |
| MV-200-24-4s | 221.22 | 225.06 | 226.11 | 226.69 | 226.11 | 226.69 |

Таблица 3.1.3 Максимальная нагрузка испытываемых профилей для третьей формы потери устойчивости m3, кН

| Наименование | Тест | 0 | m3 0.15t | m3 0.64t | m3 -0.15t | m3 -0.64t |
|--------------|--------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| MV-150-15-1 | 142.96 | 162.56 | 149.74 | 143.77 | 160.02 | 155.60 |
| MV-150-15-2 | 134.11 | 163.10 | 149.42 | 143.16 | 160.34 | 155.91 |
| MV-150-15-3 | 141.8 | 162.92 | 149.29 | 143.01 | 160.19 | 155.76 |
| MV-150-15-4s | 107.19 | 113.97 | 117.27 | 128.24 | 112.93 | 110.60 |
| MV-150-19-1 | 197.35 | 234.31 | 223.97 | 212.63 | 228.29 | 218.83 |
| MV-150-19-2 | 187.89 | 234.31 | 223.70 | 212.33 | 228.16 | 218.62 |
| MV-150-19-3 | 195.22 | 233.93 | 223.07 | 211.75 | 227.57 | 217.95 |
| MV-150-19-4s | 153.64 | 166.30 | 169.94 | 185.76 | 164.28 | 160.71 |
| MV-150-24-1 | 253.82 | 279.57 | 279.64 | 272.01 | 279.52 | 272.54 |
| MV-150-24-2 | 263.03 | 278.92 | 279.00 | 271.30 | 278.86 | 272.34 |
| MV-150-24-3 | 251.07 | 283.81 | 283.67 | 275.59 | 283.76 | 277.26 |
| MV-150-24-4s | 216.7 | 228.34 | 232.91 | 240.18 | 224.51 | 214.54 |
| MV-200-15-1 | 139.66 | 161.85 | 142.74 | 146.52 | 142.74 | 146.52 |
| MV-200-15-2 | 128.68 | 161.83 | 140.96 | 146.18 | 140.96 | 146.18 |
| MV-200-15-3 | 142.23 | 159.50 | 143.19 | 145.65 | 143.19 | 145.65 |
| MV-200-15-4s | 97.00 | 108.10 | 108.60 | 121.74 | 107.89 | 107.31 |
| MV-200-19-1 | 222.81 | 231.67 | 227.69 | 218.41 | 236.57 | 231.23 |
| MV-200-19-2 | 218.47 | 231.48 | 226.40 | 219.63 | 233.60 | 229.96 |
| MV-200-19-3 | 212.8 | 233.93 | 223.07 | 222.15 | 236.24 | 230.99 |
| MV-200-19-4s | 159.2 | 159.17 | 162.51 | 181.22 | 157.82 | 155.25 |
| MV-200-24-1 | 294.04 | 325.75 | 314.79 | 303.45 | 315.69 | 305.16 |
| MV-200-24-2 | 289.04 | 326.43 | 316.06 | 304.54 | 319.88 | 306.97 |
| MV-200-24-3 | 286.54 | 323.44 | 315.83 | 304.30 | 316.78 | 306.64 |
| MV-200-24-4s | 221.22 | 225.06 | 230.99 | 255.79 | 222.35 | 215.97 |

Таблица 3.1.4 Максимальная нагрузка испытываемых профилей для четвертой формы потери устойчивости m4, кН

| Наименование | Тест | 0 | m4 0.15t | m4 0.64t | m4 -0.15t | m4 -0.64t |
|--------------|--------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| MV-150-15-1 | 142.96 | 162.56 | 149.74 | 143.77 | 149.74 | 143.77 |
| MV-150-15-2 | 134.11 | 163.10 | 150.09 | 144.10 | 150.09 | 144.10 |
| MV-150-15-3 | 141.8 | 162.92 | 149.96 | 143.95 | 149.96 | 143.95 |
| MV-150-15-4s | 107.19 | 113.97 | 114.64 | 112.89 | 114.64 | 112.89 |
| MV-150-19-1 | 197.35 | 234.31 | 227.71 | 213.94 | 227.25 | 213.94 |
| MV-150-19-2 | 187.89 | 234.31 | 227.49 | 213.63 | 228.58 | 213.63 |
| MV-150-19-3 | 195.22 | 233.93 | 227.01 | 213.05 | 223.38 | 213.05 |
| MV-150-19-4s | 153.64 | 166.30 | 167.71 | 168.53 | 167.71 | 168.53 |
| MV-150-24-1 | 253.82 | 279.57 | 279.60 | 272.24 | 279.19 | 272.24 |
| MV-150-24-2 | 263.03 | 278.92 | 278.58 | 271.85 | 278.93 | 271.85 |
| MV-150-24-3 | 251.07 | 283.81 | 283.36 | 277.83 | 283.36 | 277.59 |
| MV-150-24-4s | 216.7 | 228.34 | 225.58 | 222.38 | 225.58 | 222.37 |
| MV-200-15-1 | 139.66 | 161.85 | 148.50 | 145.82 | 152.96 | 150.38 |

| Наименование | Тест | 0 | m4 0.15t | m4 0.64t | m4 -0.15t | m4 -0.64t |
|--------------|--------|--------|----------|----------|-----------|-----------|
| MV-200-15-2 | 128.68 | 161.83 | 148.47 | 145.82 | 151.33 | 149.02 |
| MV-200-15-3 | 142.23 | 159.50 | 147.85 | 145.51 | 148.81 | 149.03 |
| MV-200-15-4s | 97.00 | 108.10 | 107.40 | 108.21 | 107.40 | 108.21 |
| MV-200-19-1 | 222.81 | 231.67 | 226.61 | 219.81 | 229.26 | 224.04 |
| MV-200-19-2 | 218.47 | 231.48 | 229.10 | 223.75 | 229.10 | 223.75 |
| MV-200-19-3 | 212.8 | 233.93 | 226.43 | 219.68 | 229.07 | 221.90 |
| MV-200-19-4s | 159.2 | 159.17 | 160.04 | 160.95 | 160.04 | 160.95 |
| MV-200-24-1 | 294.04 | 325.75 | 314.02 | 302.80 | 315.38 | 303.11 |
| MV-200-24-2 | 289.04 | 326.43 | 316.74 | 304.00 | 316.74 | 304.00 |
| MV-200-24-3 | 286.54 | 323.44 | 316.43 | 303.69 | 316.43 | 303.69 |
| MV-200-24-4s | 221.22 | 225.06 | 227.20 | 227.93 | 227.20 | 227.93 |

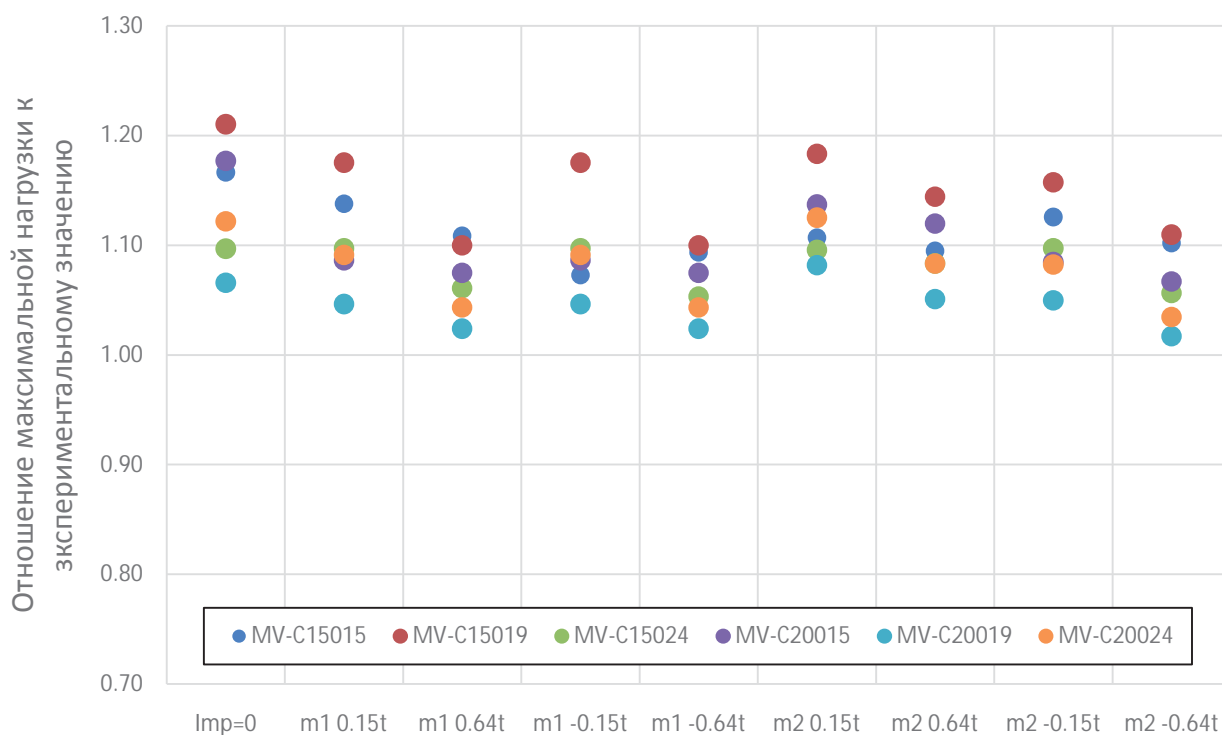


Рисунок 3.1.1 – Отношение максимальной нагрузки к экспериментальному значению, при задании начальных несовершенств по первой и второй формам потери устойчивости

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

Лист

45

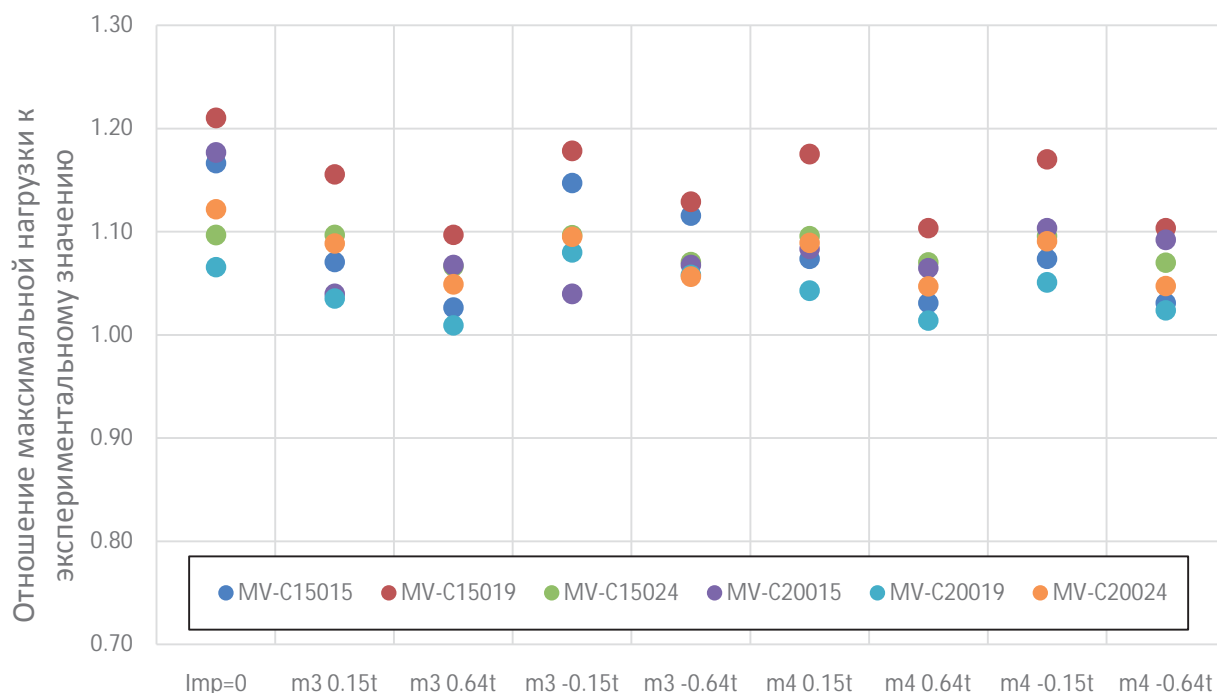


Рисунок 3.1.2 – Отношение максимальной нагрузки к экспериментальному значению, при задании начальных несовершенств по третьей и четвертой формам потери устойчивости

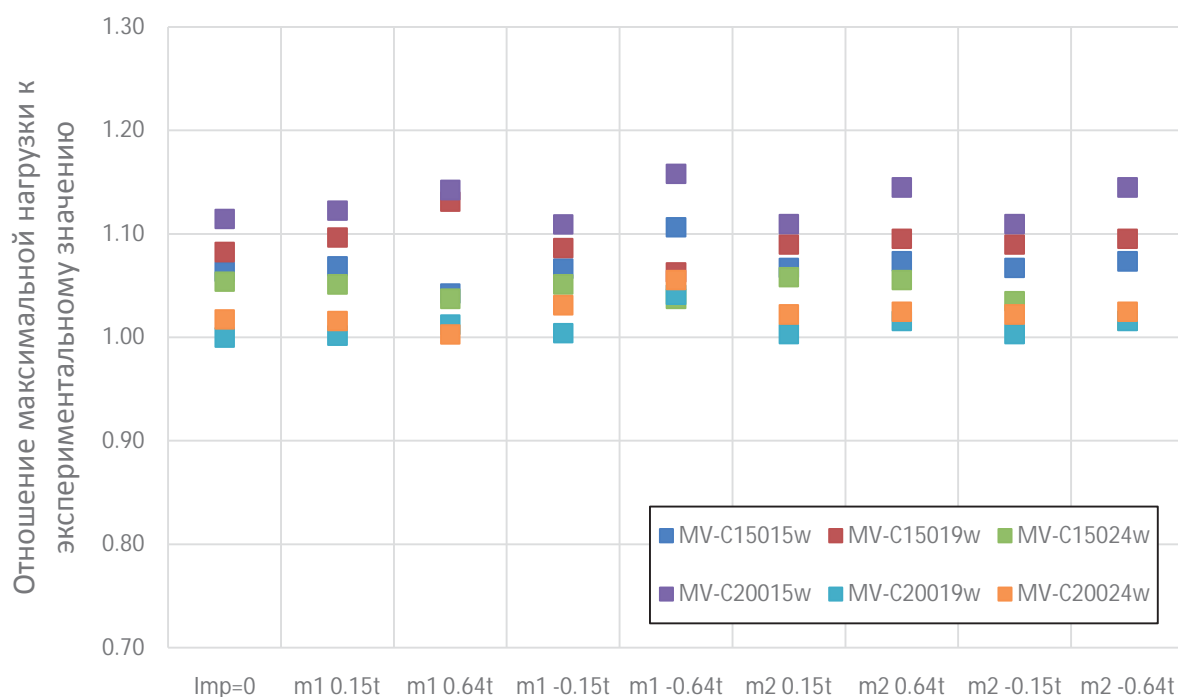


Рисунок 3.1.3 – Отношение максимальной нагрузки к экспериментальному значению, при задании начальных несовершенств по первой и второй формам потери устойчивости для профилей без центральных уголков

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

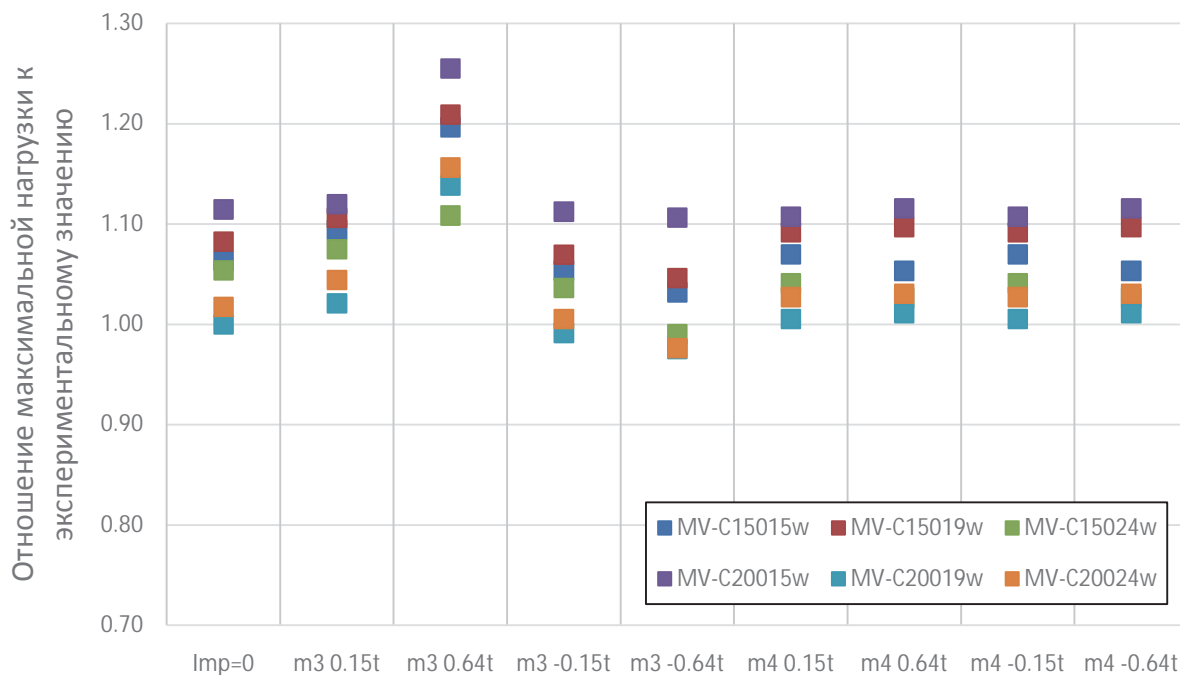


Рисунок 3.1.4 – Отношение максимальной нагрузки к экспериментальному значению, при задании начальных несовершенств по третьей и четвертой формам потери устойчивости для профилей без центральных уголков

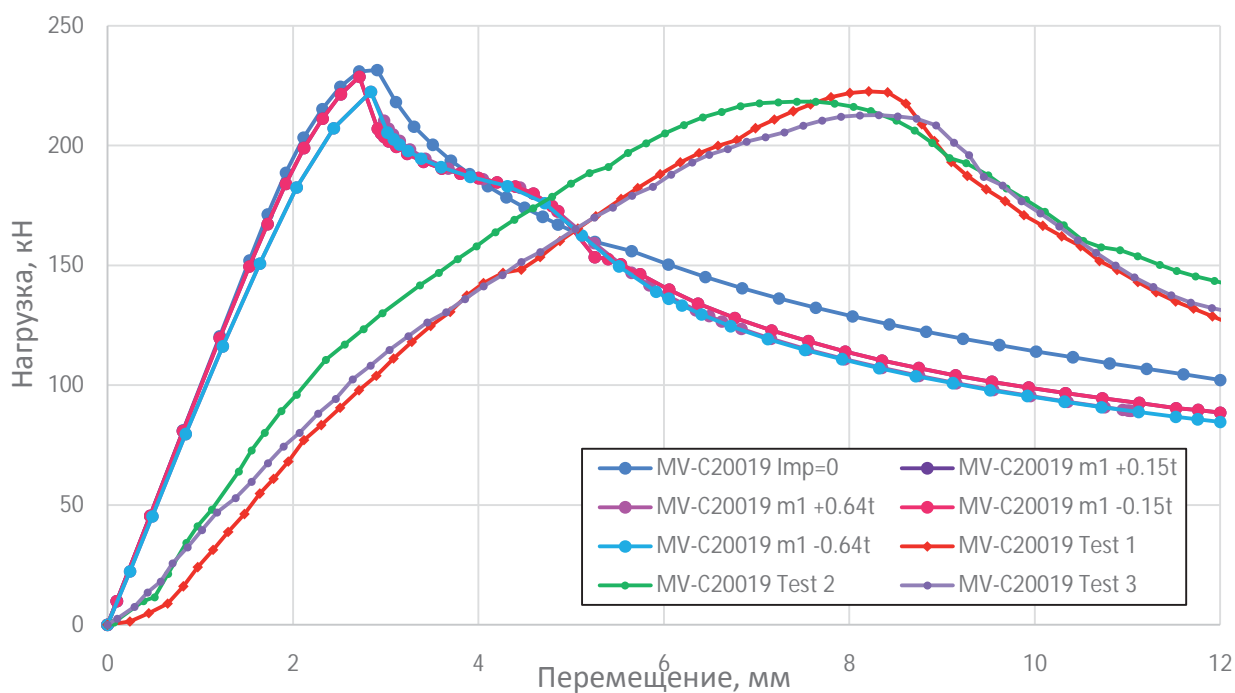


Рисунок 3.1.5 – Сравнение кривых нагружения профиля MV-C20019 экспериментальных данных и разработанной модели КЭ модели, несовершенства по первой собственной форме

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

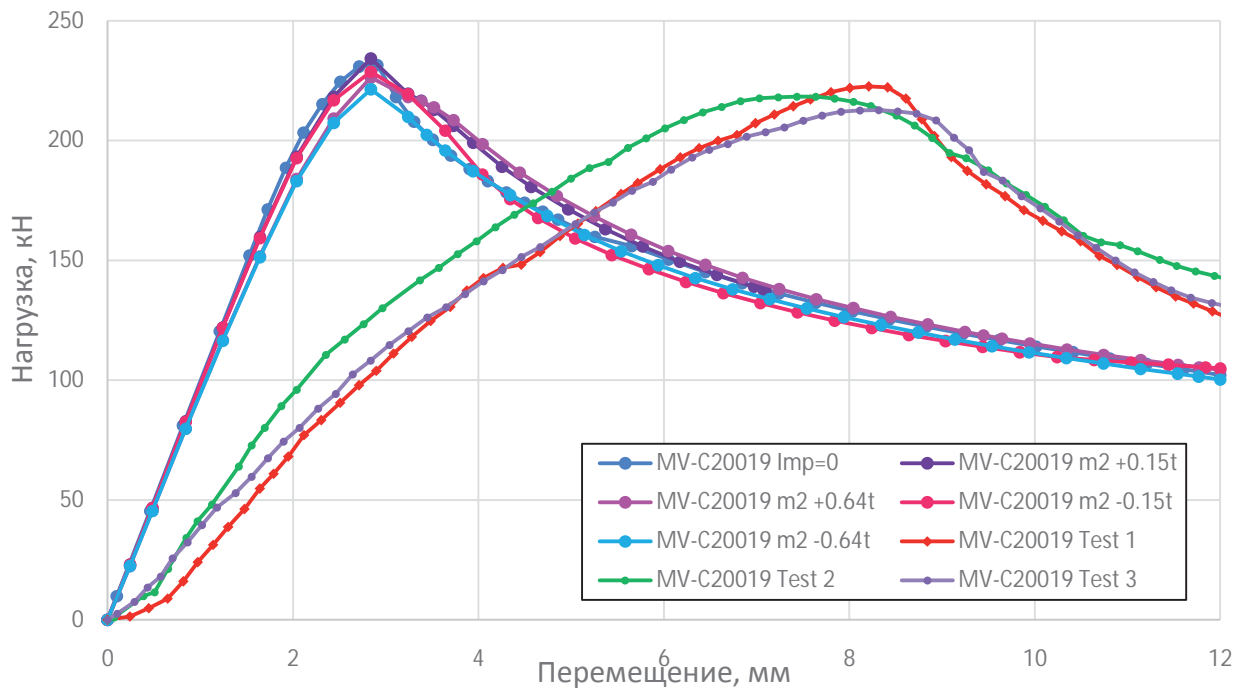


Рисунок 3.1.6 – Сравнение кривых нагружения профиля MV-C20019 экспериментальных данных и разработанной модели КЭ модели, несовершенства по второй собственной форме

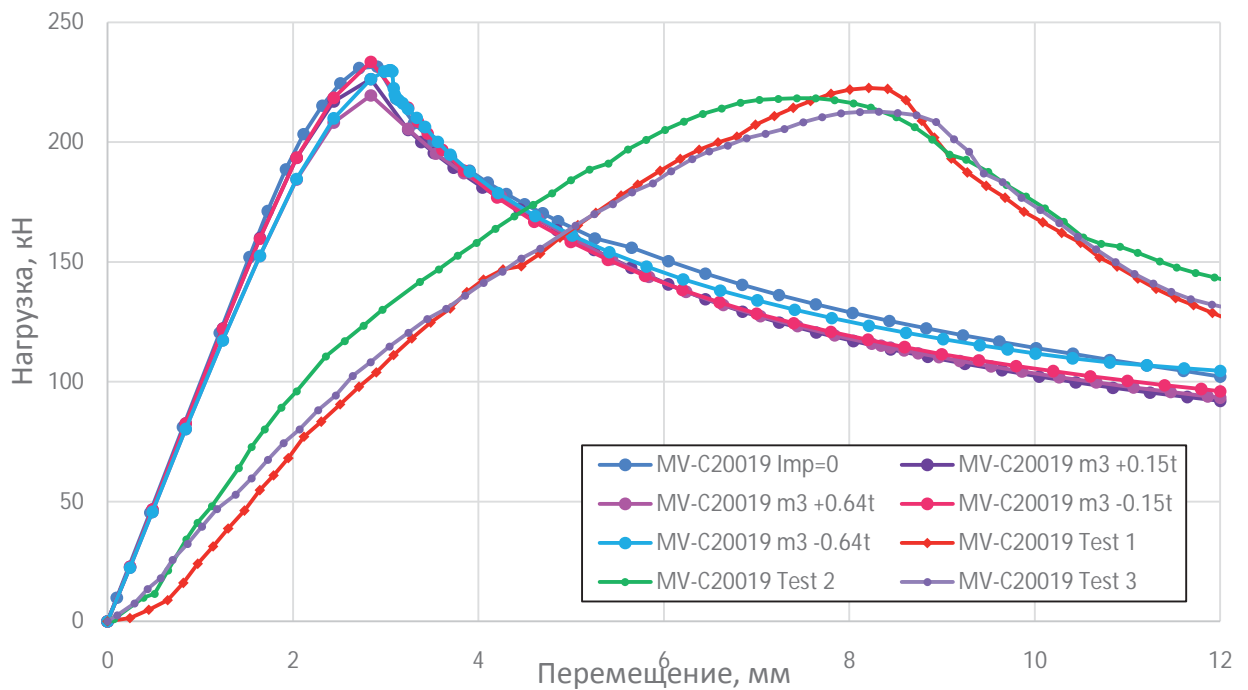


Рисунок 3.1.7 – Сравнение кривых нагружения профиля MV-C20019 экспериментальных данных и разработанной модели КЭ модели, несовершенства по третьей собственной форме

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

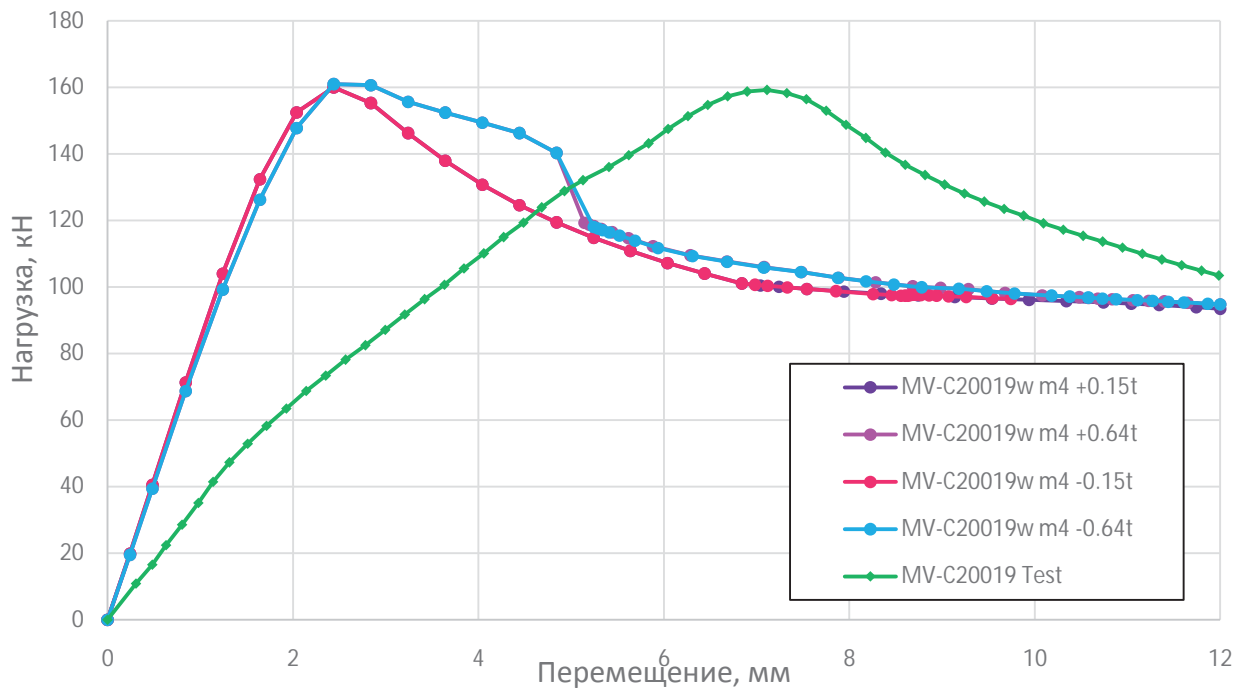


Рисунок 3.1.12 Сравнение кривых нагружения профиля MV-C20019w экспериментальных данных и разработанной модели КЭ модели, несовершенства по четвертой собственной форме

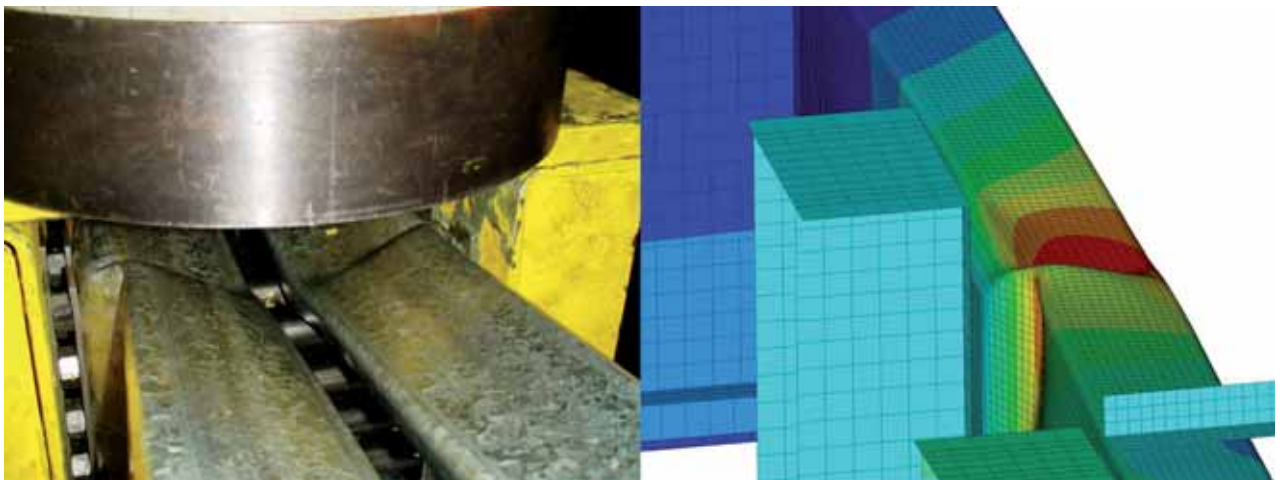


Рисунок 3.1.13 – Сравнение результатов эксперимента и моделирования (4-я форма, -0.64t) для профиля MV-C20019-4w

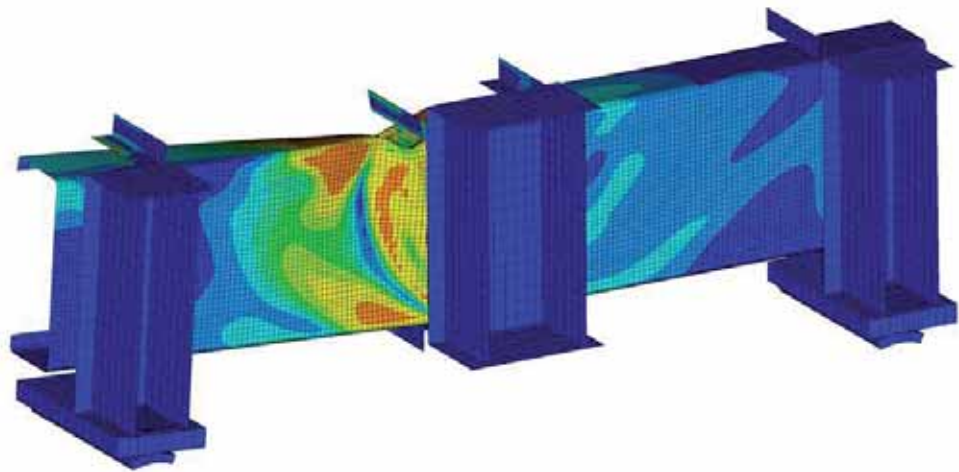
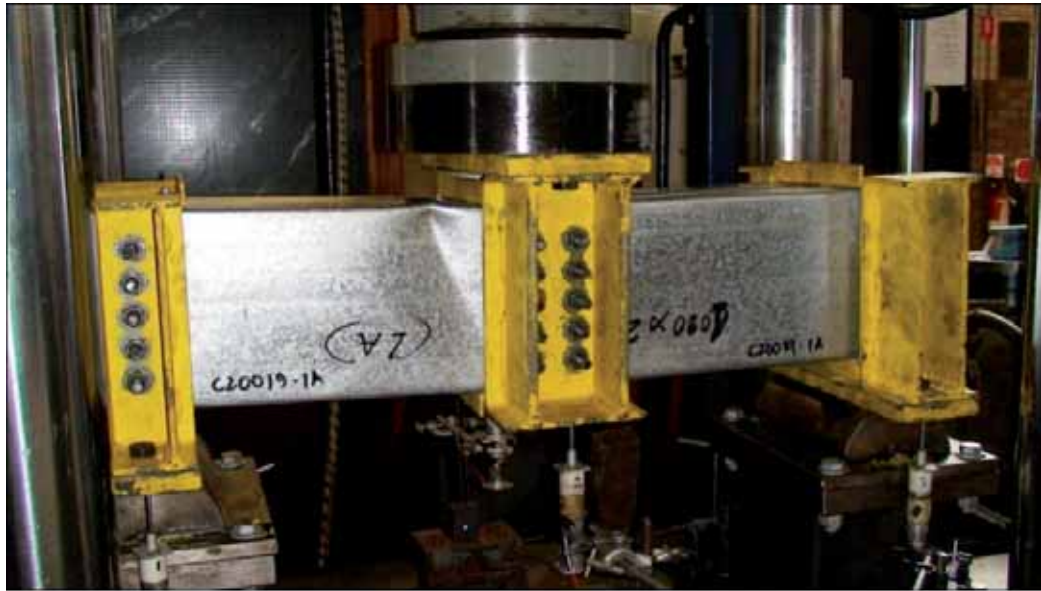


Рисунок 3.1.14 – Сравнение результатов испытания (деформированная форма) профиля MV-C20019 и моделирования

Из модели обычных холодногнутох профилей были построены термопрофили простым добавлением дырок согласно стандарту предприятия [18]

Из этого документа испытываемым профилям соответствует типоразмер ТПП с расположением термопросечек, указанных на рисунке 4.1

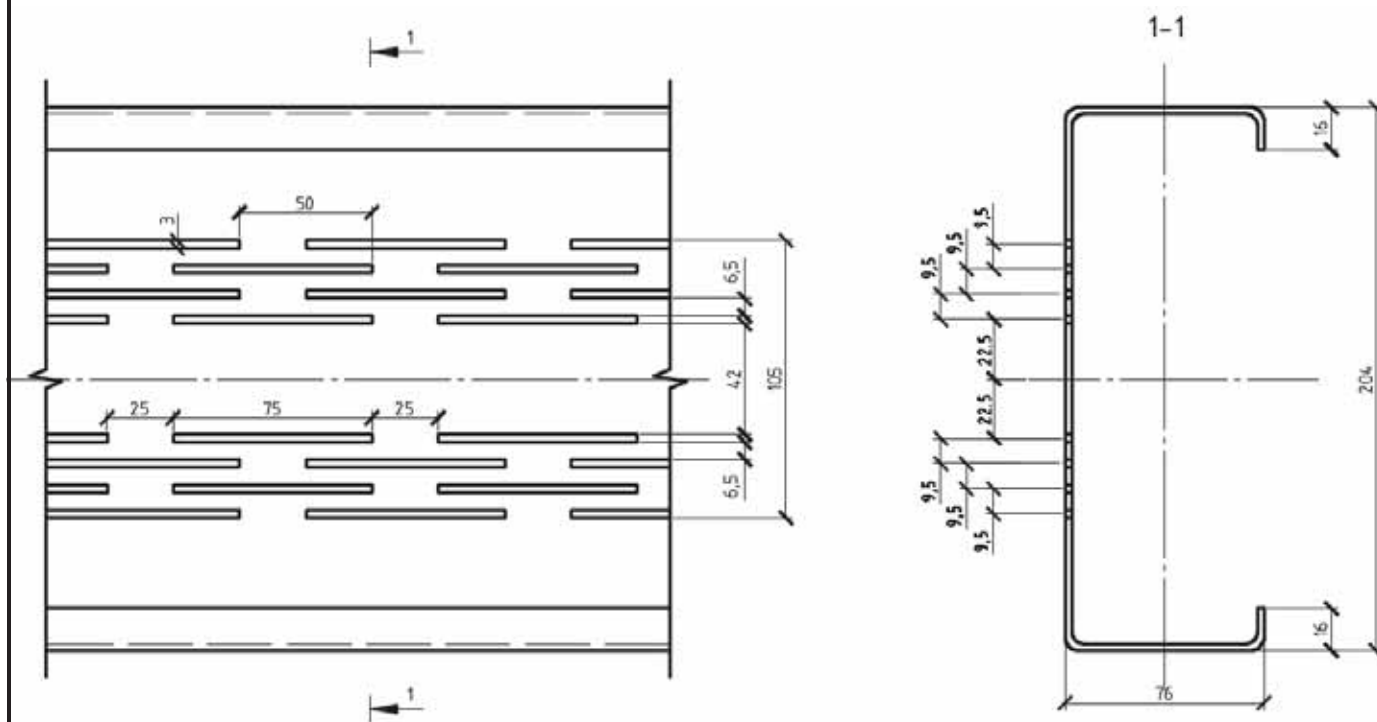


Рисунок 4.1 Термопрофиль ТПП по [18]

Во избежание лишней концентрации напряжений размер конечного элемента в части поперечного сечения с просечками был уменьшен до 3 мм

Шаг высокопрочных болтов, как в случае типоразмера С150, так и С200 не попал в перфорацию. Но чтобы исключить появления излишне вытянутого конечного элемента длиной 6 мм и шириной 0,5 мм, у С200 четные болты в вертикальном ряду были сдвинуты на 0,5 мм, что отображено на рисунке 4.2

Как видно, четный болт имеет общий узел с профилем на границе просечки. Но это не вносит ошибки в решение, так как в этом месте узлы элементов термопрофиля и холодногнутого С-образного сечения (на рисунке показано голбым цветом) связаны МРС контактом.

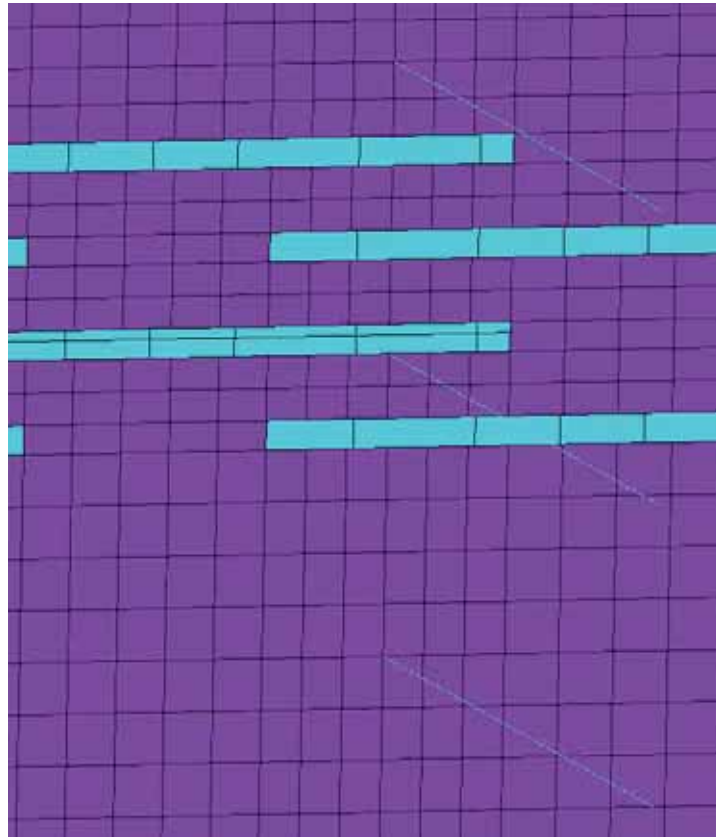


Рисунок 4.2 Сетка конечных элементов для типоразмера С200 без отображения толщины элементов. Фиолетовым цветом показан термопрофиль, голубым С-образное сечение. Голубые линии – элементы ВЕАМ188, моделирующие высокопрочные болты

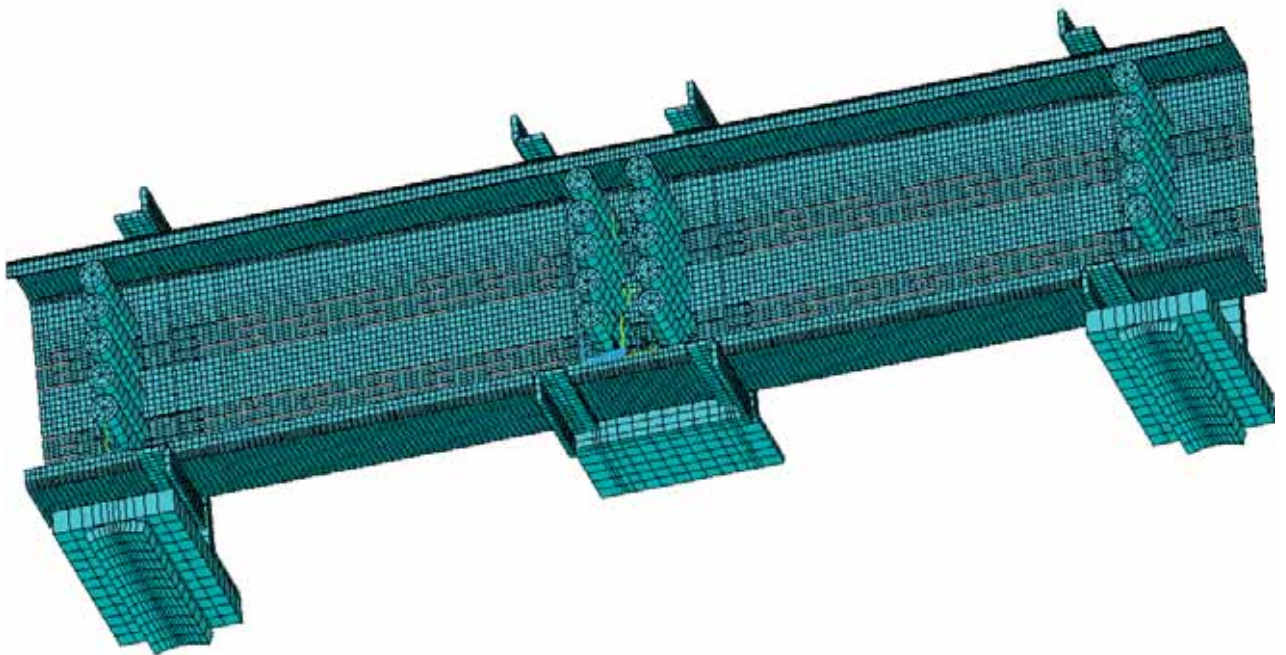


Рисунок 4.3 Конечно-элементная модель

| | | | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|--------------------|------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | Лист |
| | | | | | | 55 |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат | | |

С такой же точностью, с какой был выполнен расчет испытываемых профилей, было проведено вычисление термопрофилей. Результаты показаны в таблицах 4.1-4.2 и на рисунках 4.1-4.4

Таблица 4.1 Максимальная нагрузка термопрофилей для первой и второй мод потери устойчивости, кН

| Наименование | Imp=0 | m1 0.15t | m1 0.64t | m1 - 0.15t | m1 - 0.64t | m2 0.15t | m2 0.64t | m2 - 0.15t | m2 - 0.64t |
|--------------|-------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| MV-150-15-1 | 52,6 | 52,6 | 52,6 | 53,2 | 53,2 | 52,9 | 52,9 | 52,9 | 52,9 |
| MV-150-15-2 | 53,4 | 52,7 | 52,7 | 53,3 | 53,3 | 53,0 | 53,0 | 53,0 | 53,0 |
| MV-150-15-3 | 52,6 | 52,6 | 52,6 | 53,2 | 53,2 | 52,9 | 52,9 | 52,9 | 52,9 |
| MV-150-15-4s | 50,7 | 50,7 | 50,7 | 51,0 | 51,0 | 50,8 | 50,8 | 50,8 | 50,8 |
| MV-150-19-1 | 73,5 | 70,2 | 70,2 | 70,5 | 70,5 | 70,3 | 70,3 | 70,3 | 70,3 |
| MV-150-19-2 | 73,3 | 70,0 | 70,0 | 70,3 | 70,3 | 70,1 | 70,1 | 70,1 | 70,3 |
| MV-150-19-3 | 72,9 | 69,6 | 69,6 | 70,4 | 69,9 | 69,8 | 69,7 | 69,8 | 69,7 |
| MV-150-19-4s | 68,0 | 68,0 | 68,1 | 68,1 | 68,1 | 68,1 | 68,1 | 68,0 | 68,1 |
| MV-150-24-1 | 88,1 | 87,7 | 87,7 | 88,0 | 88,0 | 87,9 | 87,9 | 87,9 | 87,9 |
| MV-150-24-2 | 88,0 | 87,6 | 87,6 | 87,9 | 87,9 | 87,8 | 87,8 | 87,8 | 87,8 |
| MV-150-24-3 | 89,6 | 89,3 | 89,3 | 89,5 | 89,5 | 89,4 | 89,4 | 89,4 | 89,4 |
| MV-150-24-4s | 86,5 | 86,3 | 89,5 | 86,4 | 86,5 | 86,4 | 86,4 | 86,4 | 86,4 |
| MV-200-15-1 | 70,0 | 70,1 | 70,0 | 70,1 | 70,0 | 70,3 | 70,2 | 70,1 | 70,0 |
| MV-200-15-2 | 70,1 | 70,1 | 70,1 | 70,1 | 70,1 | 70,3 | 70,2 | 70,2 | 70,1 |
| MV-200-15-3 | 70,1 | 70,0 | 70,0 | 70,0 | 70,0 | 70,1 | 70,0 | 70,1 | 66,9 |
| MV-200-15-4s | 64,0 | 65,6 | 65,7 | 64,0 | 63,9 | 64,7 | 64,6 | 64,8 | 64,8 |
| MV-200-19-1 | 94,4 | 95,2 | 95,2 | 95,2 | 95,2 | 95,9 | 96,0 | 94,5 | 94,6 |
| MV-200-19-2 | 94,3 | 95,1 | 95,1 | 95,1 | 95,1 | 95,8 | 95,9 | 94,4 | 94,5 |
| MV-200-19-3 | 94,4 | 95,2 | 95,1 | 95,2 | 95,2 | 95,9 | 96,0 | 94,5 | 94,6 |
| MV-200-19-4s | 87,6 | 90,2 | 90,2 | 87,5 | 87,3 | 88,9 | 88,8 | 88,9 | 88,8 |
| MV-200-24-1 | 126,6 | 128,1 | 127,7 | 128,1 | 127,7 | 129,9 | 129,1 | 126,3 | 126,0 |
| MV-200-24-2 | 125,6 | 127,3 | 126,9 | 127,3 | 126,9 | 129,0 | 128,7 | 125,4 | 125,1 |
| MV-200-24-3 | 125,5 | 126,9 | 126,7 | 126,9 | 126,7 | 128,8 | 128,6 | 125,3 | 125,0 |
| MV-200-24-4s | 118,1 | 117,0 | 121,6 | 117,9 | 117,4 | 118,8 | 119,5 | 118,9 | 119,5 |

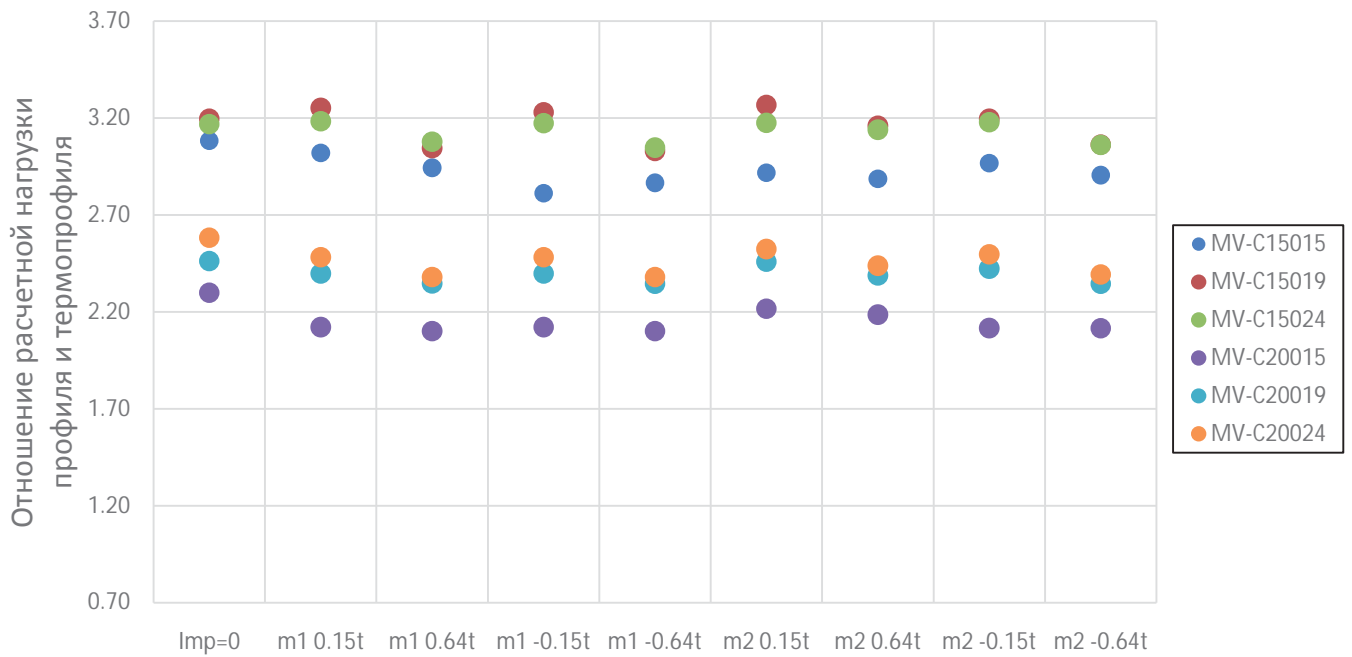


Рисунок 4.1 - Отношение расчетной нагрузки профиля и термопрофиля для первого варианта экспериментальной оснастки для первой и второй мод

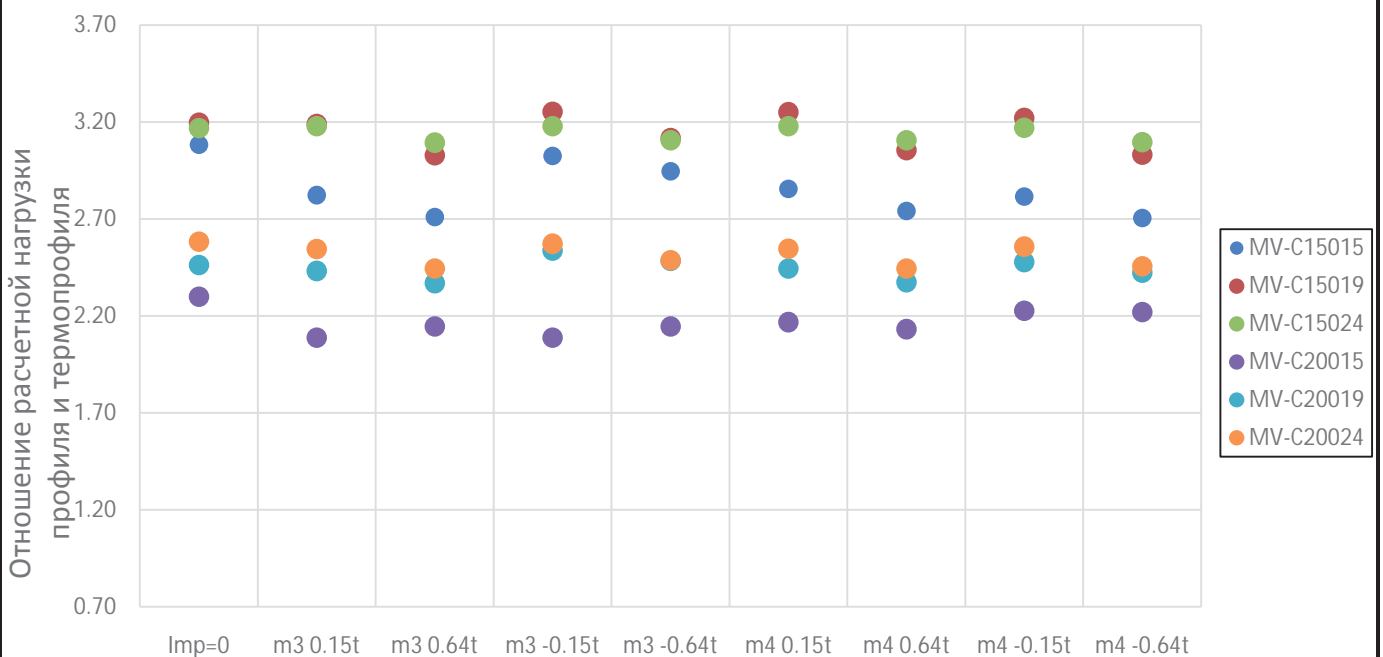


Рисунок 4.2 - Отношение расчетной нагрузки профиля и термопрофиля для первого варианта экспериментальной оснастки для третьей и четвертой мод

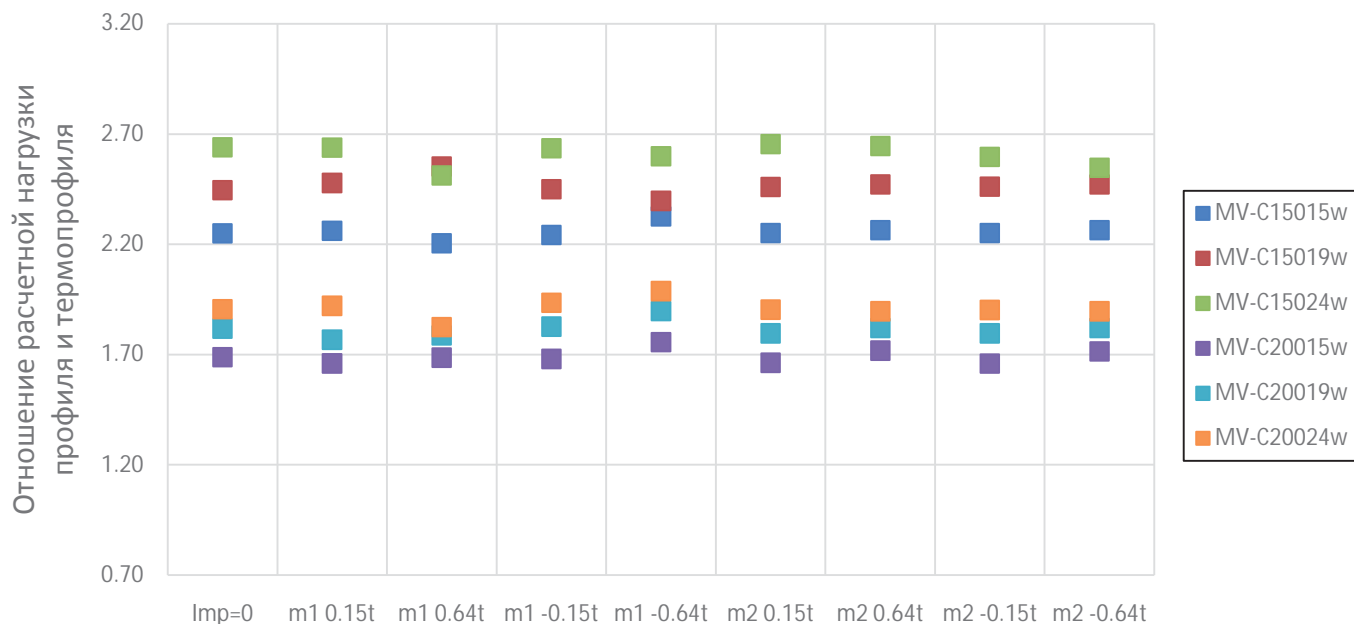


Рисунок 4.3 - Отношение расчетной нагрузки профиля и термопрофиля для второго варианта экспериментальной оснастки для первой и второй мод

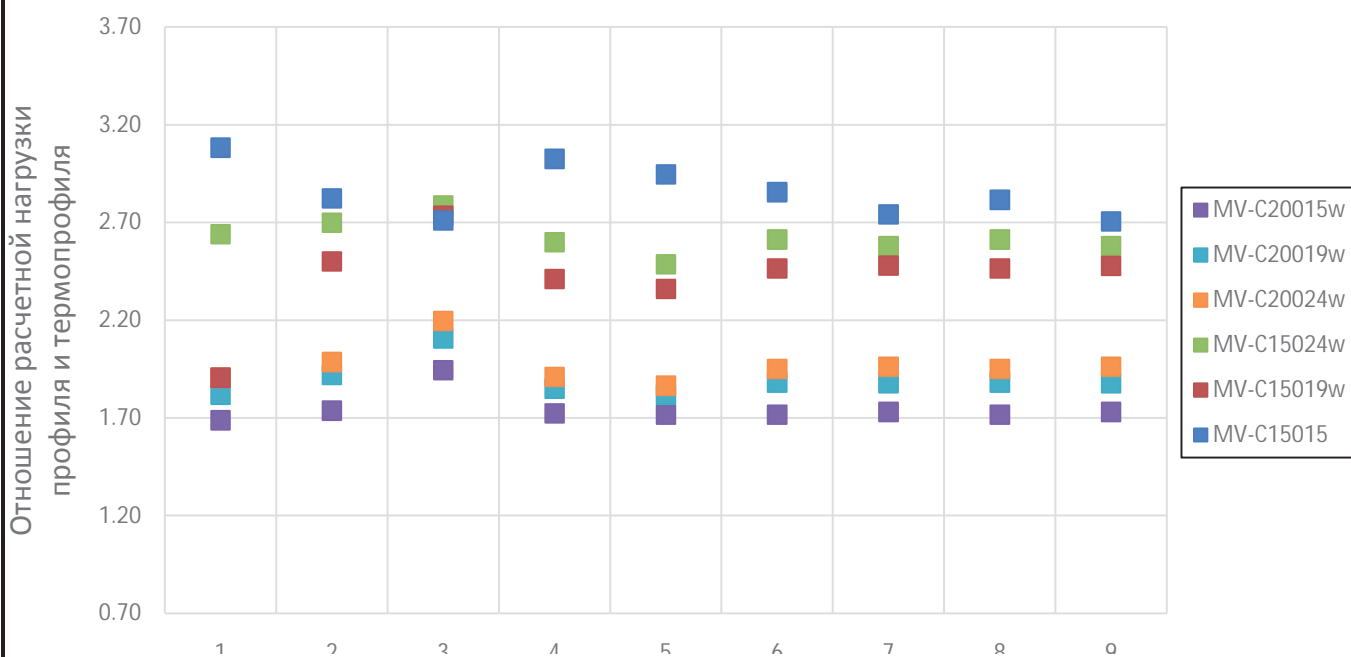


Рисунок 4.4 - Отношение расчетной нагрузки профиля и термопрофиля для второго варианта экспериментальной оснастки для третьей и четвертой мод

На рисунках показаны перемещения из плоскости профиля от первых четырех мод потери устойчивости, нормированные к единице.

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

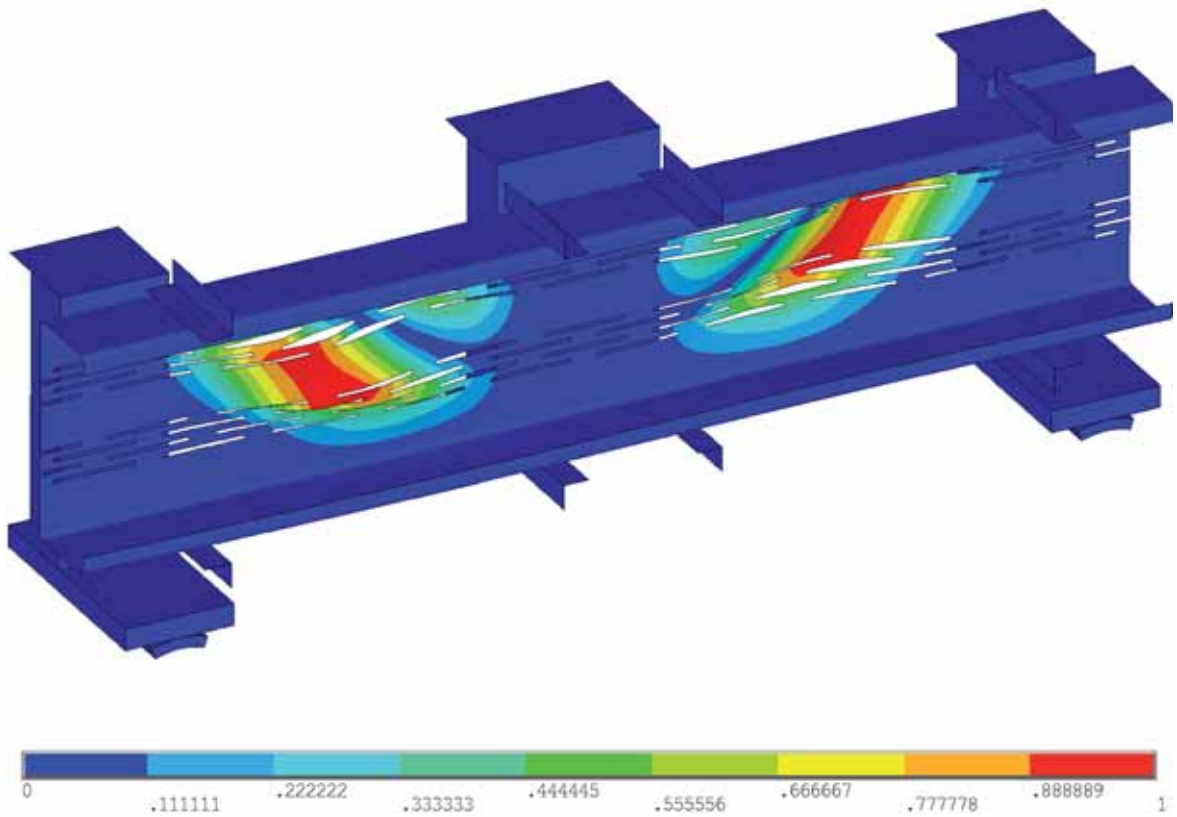


Рисунок 4.7 – Перемещения из плоскости профиля С15019 от 3 моды

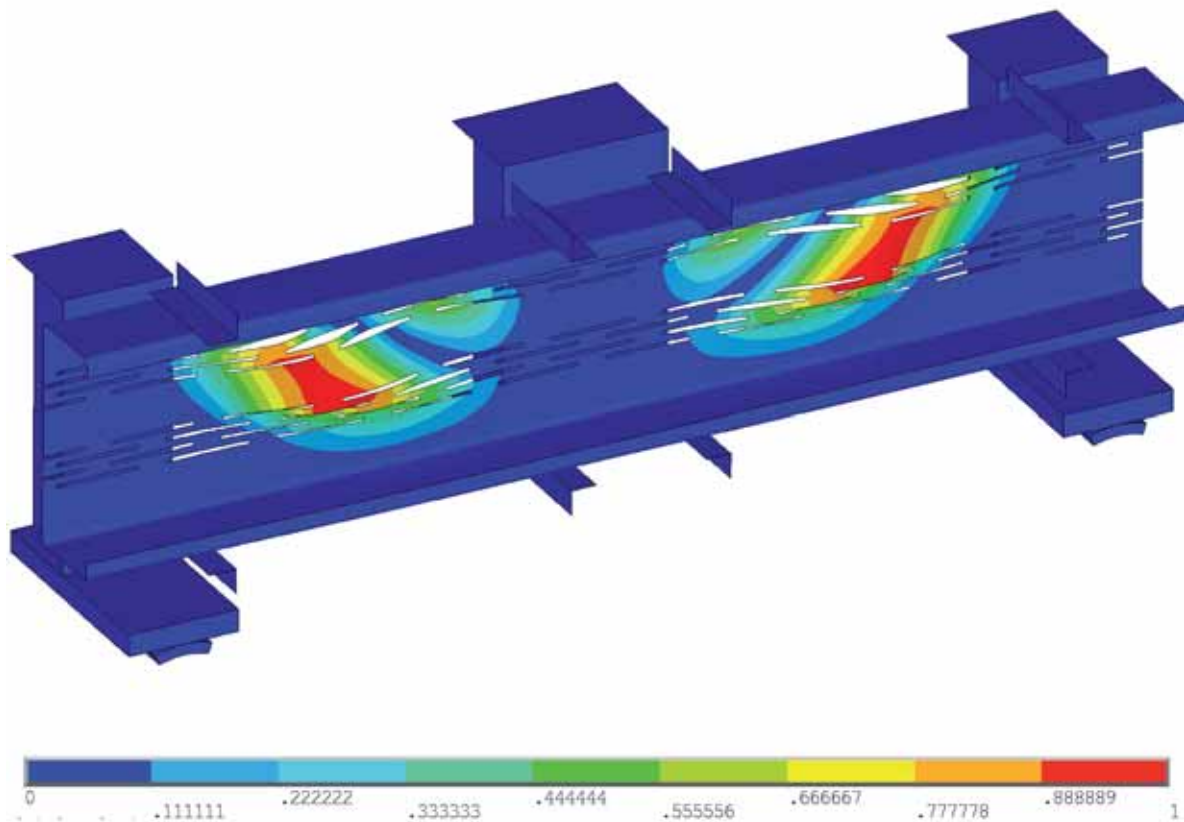


Рисунок 4.8 – Перемещения из плоскости профиля С15019 от 4 моды

| | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|
| | | | | |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат |

270102-2018-209-ПЗ

Лист

61

Таблица 4.3

| Наименование | Среднее отношение расчетной нагрузки профиля и термопрофиля | Дисперсия, кН |
|--------------|---|---------------|
| MV-150-15-1 | 2,88 | 0,063841 |
| MV-150-15-2 | 2,70 | 0,078683 |
| MV-150-15-3 | 2,71 | 0,063585 |
| MV-150-15-4s | 2,27 | 0,013942 |
| MV-150-19-1 | 3,15 | 0,616816 |
| MV-150-19-2 | 3,04 | 0,59744 |
| MV-150-19-3 | 3,04 | 0,606818 |
| MV-150-19-4s | 2,48 | 0,004039 |
| MV-150-24-1 | 3,14 | 0,019821 |
| MV-150-24-2 | 3,10 | 0,018114 |
| MV-150-24-3 | 3,10 | 0,009572 |
| MV-150-24-4s | 2,61 | 0,575534 |
| MV-200-15-1 | 2,15 | 1,070656 |
| MV-200-15-2 | 2,20 | 1,064655 |
| MV-200-15-3 | 2,20 | 1,255033 |
| MV-200-15-4s | 1,72 | 1,405798 |
| MV-200-19-1 | 2,42 | 1,592263 |
| MV-200-19-2 | 2,42 | 1,589856 |
| MV-200-19-3 | 2,40 | 1,562207 |
| MV-200-19-4s | 1,86 | 3,55254 |
| MV-200-24-1 | 2,48 | 3,832912 |
| MV-200-24-2 | 2,46 | 4,130095 |
| MV-200-24-3 | 2,46 | 3,943445 |
| MV-200-24-4s | 1,94 | 2,556308 |

Из таблицы 4.3 видно, что влияние начальных несовершенств по форме потери устойчивости достаточно мало. Термопрофиль выдерживает нагрузку в несколько раз меньшую, чем аналогичный неперфорированный профиль.

5 Выводы и рекомендации

| | | | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|--------------------|------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | Лист |
| | | | | | | 63 |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат | | |

Анализ полученные данных, показывает, что форма деформирования и максимальная нагрузка неперфорированных профилей хорошо согласуются с экспериментом. Отличие от эксперимента не превышает 10% процентов практически для всех форм начальных несовершенств, что соответствует статистическому разбросу исходных данных, а также совпадает с результатами, полученными в [11] в системе ABAQUS. Наименьшее отличие от экспериментальных данных по совокупности результатов показывает моделирование начальных несовершенств с использованием 3-й формы потери устойчивости с коэффициентом $+0.64t$ для профилей, испытанных по первому варианту экспериментальной оснастки; $-0.64t$ для профилей по второму варианту.

Отличия в наклоне расчетных кривых «перемещение-нагрузка», очевидно, обусловлены неописанными особенностями экспериментальной установки, так как в похожей расчетной модели в пакете ABAQUS [11] присутствуют точно такие же различия.

Термопрофили – конструкция, способная воспринять намного большие деформации до своего разрушения. Кривая деформирования выпуклая и не имеет явно выраженного «хлопка», как у неперфорированных образцов. Что свидетельствует о том, что пластинки между просечками в процессе нагружения в ANSYS теряли устойчивость не одновременно.

Что касается нагрузки, различия в максимальной составляющей для профилей и термопрофилей в условиях поперечного изгиба составляет в пределах нескольких раз.

Однако в австралийском отчете диаграмма растяжений была представлена только до 1% относительного удлинения. И не было данных ни о химическом составе стали, ни о термической обработке, чтобы можно было достроить кривую. Из чего следует не совсем физичная работа термопрофилей при значительных деформациях, которые испытывают плоские части стенки между перфорацией. Есть картинки, например, рисунок 5.1 со значением одного из главных напряжений, большим предела текучести. Что является

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 64 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

чисто численным эффектом и может внести погрешности в результат конечно-элементного расчета.

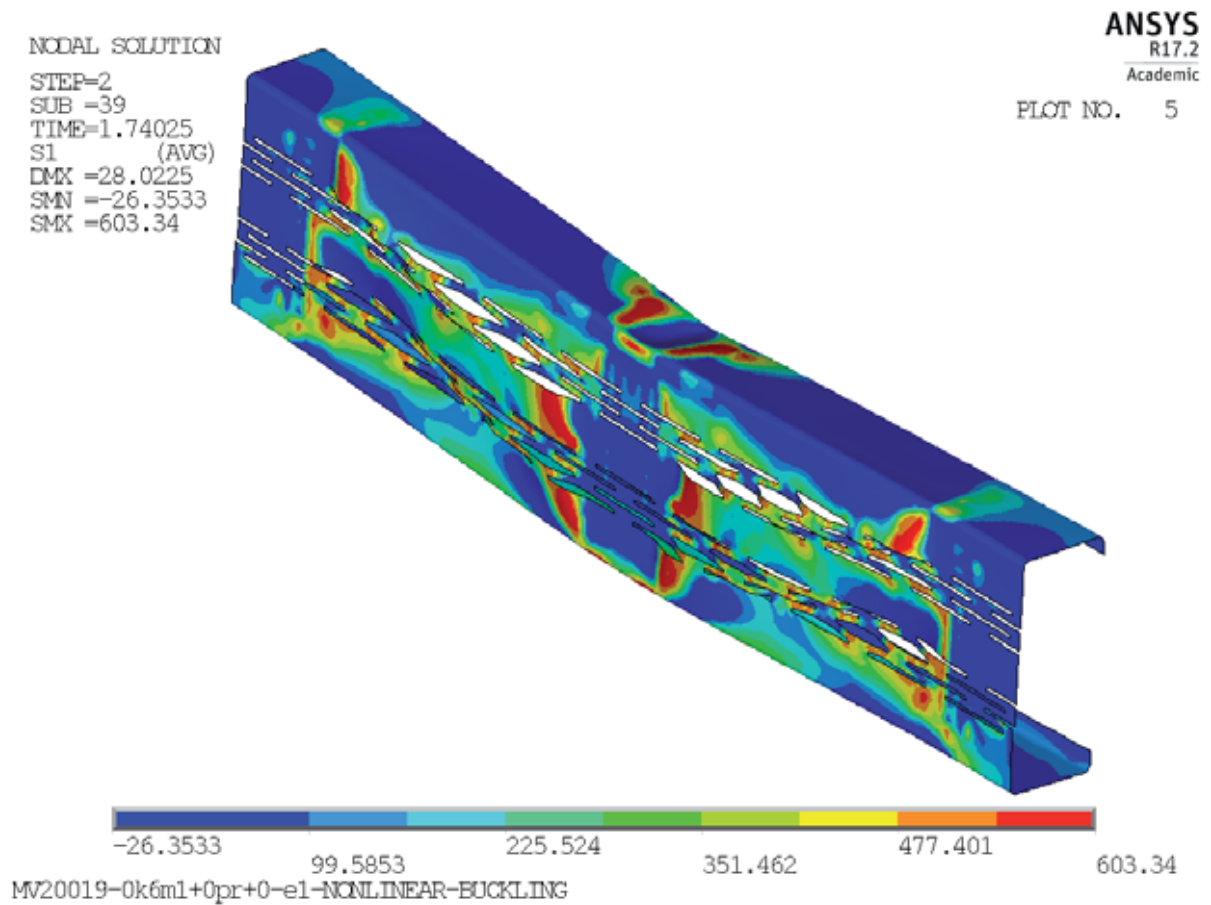


Рисунок 5.1 – Нефизичная работа модели материала

Рекомендуется учитывать упрочнение стали при численных расчетах со значительными пластическими деформациями.

| | | | | | | |
|-----|------|--------|-------|-----|--------------------|------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | Лист |
| | | | | | | 65 |
| Изм | Лист | № докм | Подп. | Дат | | |

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петросова Д.В. Экспериментальное исследование теплового режима легкой ограждающей конструкции в натуральных условиях / Д.В. Петросова, Н.М. Кузьменко, Д.В. Петросов // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – Т. 8. – № 43. – С. 31-37.
2. Савицкий Н.В. Теплоизолирующие характеристики термопрофиля зданий и систем из ЛСТК / Н.В. Савицкий, А.А. Несин, А.В. Береза // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2011. – Т. 5.
3. СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутох оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования. – Москва, 2016.
4. Шатов Д.С. Конечнoэлементное моделирование стальных тонкостенных перфорированных стоек : Магистерская диссертация / Д.С. Шатов. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011. – 133 с.
5. Дегтярева Н.В. Экспериментально-теоретические исследования прочности термопрофилей на срез и разработка рекомендаций по расчету / Н.В. Дегтярева.
6. Молчанова Н.В. Местная устойчивость элементов стальных тонкостенных балочных перекрытий : Диссертация на соискание квалификации магистра техники и технологии / Н.В. Молчанова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет, 2015. – 93 с.
7. Kesti J. Local and Distortional Buckling of Perforated Steel Wall Studs : Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology / J. Kesti. – Espoo: Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Laboratory of Steel Structures, 2000. – 121 p.
8. Degtyarev V. Finite element modeling of cold-formed steel channels with solid and slotted webs in shear / V. Degtyarev, N. Degtyareva // Thin-Walled Structures. – 2016. – Т. 103. – С. 183-198.
9. Borglund J. Bärformåga för slitsade stålreglar : M.Sc. thesis / J. Borglund, J. Jonsson. – Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, Department of Structural Engineering, Stockholm, 1997. – 63 p.
10. Pham Cao Hung. Experimental Investigation of High Strength Cold-Formed C -Sections in Combined Bending and Shear / Pham Cao Hung, Hancock Gregory J. // Journal of Structural Engineering. – 2010. – Vol. 136. – № 7. – P. 866-878.
11. Pham C.H. Numerical simulation of high strength cold-formed purlins in combined bending and shear / C.H. Pham, G.J. Hancock // Journal of Constructional Steel Research. – 2010. – Vol. 66. – № 10. – P. 1205-1217.

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 66 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |

12. Selvaraj S. Geometric imperfection measurements on cold-formed steel channels: An approach using 3D non-contact laser scanner / S. Selvaraj, M. Madhavan. – 2017. – Vol. 1. – P. 1657-1666.
13. Schafer B. Direct Strength Prediction of Cold-formed Steel Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions / B. Schafer, T. Pekoz // International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. – 1998.
14. Abdel-Rahman Nabil. Material Properties Models for Analysis of Cold-Formed Steel Members / Abdel-Rahman Nabil, Sivakumaran K. S. // Journal of Structural Engineering. – 1997. – Vol. 123. – № 9. – P. 1135-1143.
15. European Standard EN 1993-1-5:2006/AC:2009. Eurocode 3 – design of steel structures – Part 1–5: Plated structural elements. – Brussels: European Committee for standardization, 2009.
16. Evaluation of the erosion of critical buckling load of cold-formed steel members in compression based on Koiter asymptotic analysis / G. Zagari [et al.] // Thin-Walled Structures. – 2016. – Vol. 108. – P. 193-204.
17. Dubina D. Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members / D. Dubina, V. Ungureanu // Thin-Walled Structures. – 2002. – Vol. 40. – № 3. – P. 239-262.
18. СТО 42481025 006-2007. Термопрофили стальные гнутые для строительных конструкций. Технические условия. – Челябинск: ЗАО «ИНСИ», 2007.

| | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|--------------|------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | 270102-2018-209-ПЗ | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 67 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докм</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дат</i> | | |