

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
институт
Строительные конструкции и управляемые системы
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ С.В. Деордиев

подпись инициалы, фамилия

« ____ » _____ 20 __ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных
тонкостенных несущих элементов с применением пенозаполнителя

тема

08.04.01 Строительство

код и наименование направления

08.04.01.03 Теория и проектирование зданий и сооружений

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель _____ Тарасов А.В.
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник _____ Самадов Н.С.
подпись, дата инициалы, фамилия

Рецензент _____ Гавриленко А.Г.
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Красноярск 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 Состояние вопроса и задачи исследования	7
1.1 Характеристика легких стальных тонкостенных профилей.....	7
1.1.1 Холодногнутой тонкостенный профиль в строительных конструкциях	7
1.1.2 Классификация легких стальных профилей	9
1.1.3 История развития теории тонкостенных конструкций.....	12
1.1.4 Потеря устойчивости. Местная потеря устойчивости	14
1.2 Поиск и анализ материала для создания комбинированного элемента из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения.....	17
1.2.1 Применение вспененных материалов в легких стальных тонкостенных конструкция	17
1.2.2 Материал для заполнения внутренней полости балки замкнутого сечения	18
1.3 Конструктивное решение скомбинированных элементов.....	23
1.4 Выводы по главе.....	25
Глава 2 Экспериментальное исследование адгезии пенополиуретана к металлу	26
2.1 Образцы для экспериментального исследования адгезии пенополиуретана к металлу	26
2.2 Выводы по главе.....	31
Глава 3 Численное исследование балок из стальных тонкостенных Σ - профилей замкнутого сечения	32
3.1 Численное моделирование	33
3.2 Определение значения критического напряжения потери устойчивости .	34

3.3 Результаты численного расчета.....	36
3.4 Выводы по главе.....	41
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	42
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	45
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	46
Приложение А	53

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

В условиях активного развития сегмента инновационных строительных технологий в России постоянно увеличивается число проектно-строительных компаний, предлагающих клиентам современные и экономически обоснованные комплексные строительные системы и услуги.

К числу подобных предложений сегодня относится и быстрое строительство зданий и сооружений с металлическим каркасом из ЛСТК (легких стальных тонкостенных конструкций). Данная технология строительства зданий и сооружений достаточно широко и эффективно используется во многих странах.

Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) являются одной из областей широкого класса легких металлических конструкций (ЛМК). Характерными чертами ЛМК и ЛСТК являются: малая металлоемкость, высокая технологичность и приспособленность для изготовления на поточных автоматизированных линиях, легкость транспортировки, а также для конвейерно-блочных и других скоростных методов монтажа; высокая степень заводской готовности, возможность комплектной поставки целых зданий-модулей и их несущих конструкций. Основным элементом ЛСТК является тонкостенный холодногнутой оцинкованный профиль.

Одним из основных достоинств ЛСТК является небольшой вес конструкций, поэтому в данной работе рассматривается возможность увеличения несущей способности без существенного увеличения общего веса конструкций за счет применения вспененных материалов.

Целью магистерской работы является:

- определение несущей способности балок из стальных холодногнутой оцинкованных профилей замкнутого сечения заполненных вспененным материалом.

Задачи исследования:

1) Провести анализ материала для создания комбинированного элемента из стального тонкостенного профиля замкнутого сечения с заполнением внутренней полости.

2) Определить адгезию пены к металлу.

3) Выполнить численное исследование балок из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения как пустотелых, так и с заполнением внутренней полости вспененным материалом.

4) Произвести анализ численных результатов для дальнейшего испытания конструкции из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения как пустотелых, так и с заполнением внутренней полости вспененным материалом и оценить эффективность принятого конструктивного решения.

Научная новизна диссертации:

Установлено воздействия заполнителя в виде вспененного материала на несущую способность балок из стальных холодногнутых оцинкованных профилей из двух составного коробчатого сечения.

Практическая значимость работы:

По результатам и численных исследований выявлено, что при заполнении вспененным материалом внутренней полости замкнутой балки из стальных тонкостенных Σ -профилей происходит увеличение несущей способности на 27,7%.

Достоверность результатов обеспечена:

– использованием основных положений теории расчета металлических конструкций, механики деформированного твердого тела и строительной механики;

– использованием сертифицированных расчетных комплексов для выполнения численных исследований и сертифицированного оборудования для выполнения экспериментальных исследований;

На защиту выносятся:

Результаты экспериментальных исследований адгезии пенополиуретана к стальному профилю и численные исследования балок из стальных тонкостенных Σ -профилей замкнутого сечения заполненных пенополиуретаном.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Диссертация содержит 54 страницы, 23 рисунков, 7 таблиц, список использованных источников из 69 наименований.

Глава 1 Состояние вопроса и задачи исследования

1.1 Характеристика легких стальных тонкостенных профилей

1.1.1 Холодногнутой тонкостенный профиль в строительных конструкциях

В настоящее время наиболее эффективной технологией строительства быстр возводимых сооружений является использование каркасной системы из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК).

Однако столь важное свойство, как легкость, может заметно сказаться на несущей способности конструкции. Поэтому легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) перед их внедрением в строительство должны быть подвергнуты тщательному анализу по несущей способности.

Основным строительным элементом ЛСТК является тонкостенный холодногнутой профиль, изготовленный на профилегибочном оборудовании из высокопрочной низкоуглеродистой оцинкованной стали.

Основным отличием ЛСТК от других стальных конструкций является применение холодноформированных профилей из оцинкованной стали толщиной от 1 до 4 мм. Это дает ряд преимуществ ЛСТК перед традиционными конструкциями из горячекатаного проката:

Таблица 1 – Основные преимущества ЛСТК

№	Преимущество использования ЛСТК	Примечание
1	Уменьшение затрат на строительство	<ul style="list-style-type: none">– снижение трудозатрат, возможность монтажа без применения кранов и других грузоподъемных механизмов– снижение расходов на устройство фундаментов за счет снижения веса конструкций (экономия на нулевом цикле до 30-60%)– высокая степень заводской готовности компонентов, простоты и унификации сборочных элементов– низкие эксплуатационные расходы

Окончание таблицы 1

№	Преимущество использования ЛСТК	Примечание
1	Уменьшение затрат на строительство	<ul style="list-style-type: none"> – готовность внутренней поверхности под чистовую отделку – экономия отделочных материалов благодаря высокой точности и правильной геометрии металлоконструкций – высокая контролируемость используемых материалов – относительно невысокие трудозатраты на строительство
2	Сокращение сроков строительства	<ul style="list-style-type: none"> – отсутствие «мокрых» процессов и высокая скорость монтажа
3	Экологичность материала	<ul style="list-style-type: none"> – возможность рециркуляции металлоконструкций неограниченное количество раз – не впитывает и не выделяет химикаты – сокращение затрат первичной энергии (необходимость подогрева бетона и его компонентов в процессе приготовления, транспортировки и застывания)
4	Высокая точность изготовления	<ul style="list-style-type: none"> – обеспечивается минимально допустимыми погрешностями при производстве на заводе и позволяет сократить расходы на выравнивание и доработку конструкций на стройплощадке, а также обеспечивает быстрый и точный монтаж остальных элементов здания (окон, дверей, фасадов, оборудования)
5	Возможность индивидуальных архитектурно-планировочных решений	
6	Возможность экономичного строительства в сложных климатических зонах (Крайний Север, сейсмоопасные районы)	
7	Технические преимущества	<ul style="list-style-type: none"> – энергоэффективность, снижение эксплуатационных затрат на отопление и кондиционирование – увеличение внутренних площадей за счет малой толщины стен при сохранении тех же теплотехнических характеристик – малый вес конструкции – стойкость к динамическим нагрузкам – огнестойкость – долговечность, срок службы стали около 100 лет – возможность внесезонного строительства благодаря «сухости» процесса – возможность эффективного ремонта и реконструкции

Область применения стальных тонкостенных конструкций: малоэтажные здания жилого [1] и общественного назначения, промышленные объекты, объекты реконструкции [2] и специальные конструкции.

1.1.2 Классификация легких стальных профилей

Анализ мировых тенденций в строительстве и применении строительных материалов приводит к выводу, что применение гнутых профилей в строительстве быстровозводимых зданий год от года расширяется и затрагивает все новые типы конструкций, при этом отслеживается тренд к уменьшению толщины таких профилей; для предотвращения потери местной устойчивости в таких профилях ЛСТК часто устраивается продольное гофрирование.

Основные конструктивные элементы быстровозводимого здания - оцинкованный профиль и профлист - производятся по технологии холодного формования стальной ленты при прокате. Данная технология уже давно и широко применяется в различных отраслях промышленности, глубоко развита и изучена, не требует использования большого количества ручного труда, оборудования, ресурсов, что позволяет получать высокоточную геометрию и стабильные свойства готовой продукции с гарантированными параметрами (площадь сечения, моменты сопротивления, осевые моменты инерции, радиусы инерции).

Тонкостенный профиль является стержнем, у которого все три характерный размера существенно отличаются: толщина стенки намного меньше протяженности профиля поперечного сечения, которая, в свою очередь, намного меньше длины стержня (рисунок 1).

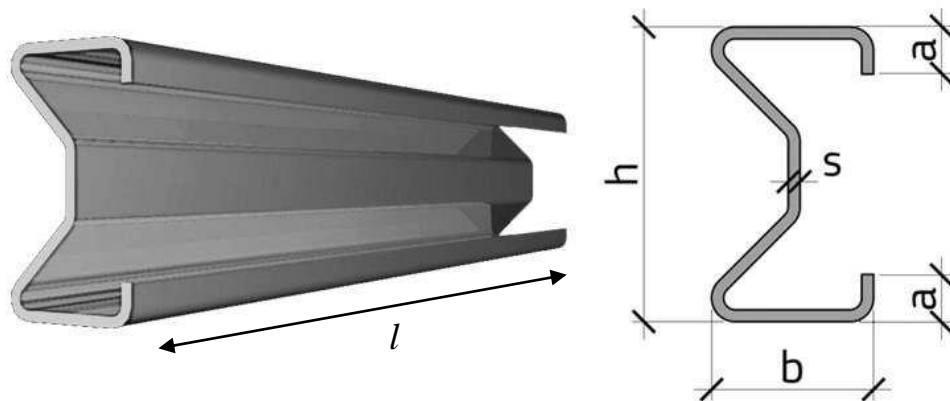


Рисунок 1 – Схема тонкостенного стержня

Сортамент тонкостенных холодногнутых профилей разнообразный [3], в зависимости от предназначения профиля используются различные формы сечения (рисунок 2).

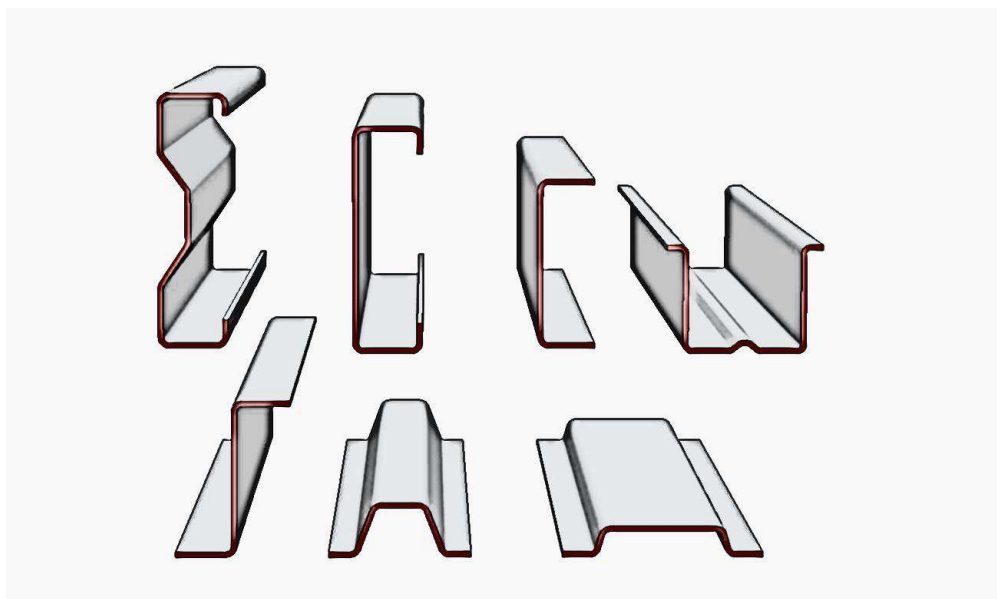


Рисунок 2 – Сортамент сечений тонкостенных профилей
(С, Σ , П-образные)

Наиболее распространенными сечениями тонкостенных профилей для несущих конструкций является С, Σ , Z-образные сечения. Так же используются составные сечения, состоящие из двух и более одиночных профилей (рисунок 3).

Для соединения одиночных профилей в составные используются самонарезные винты, заклепки, болты. Сварное соединение для тонкостенных профилей применяется крайне редко так, как небольшая толщина профилей повышает риск сквозной проварки, а также приводит к нарушению цинкового покрытия.

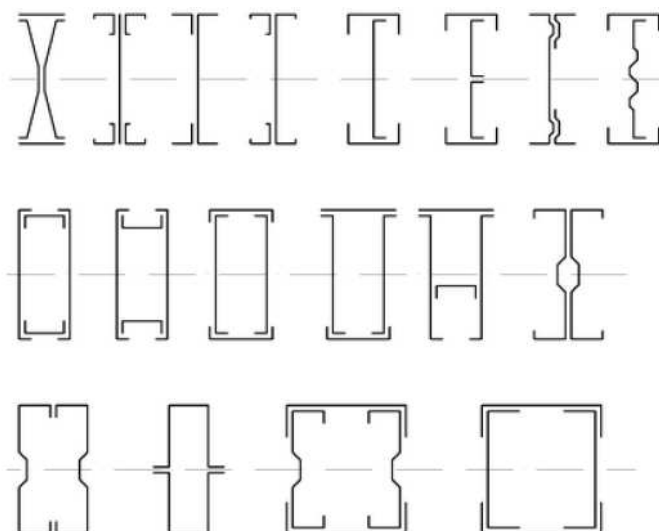


Рисунок 3 – Составные сечения элементов конструкций из стальных тонкостенных, холодногнутых профилей

Тонкостенные профили можно разделить на две категории (рисунок 4):

- открытого сечения;
- замкнутого (закрытого) сечения.

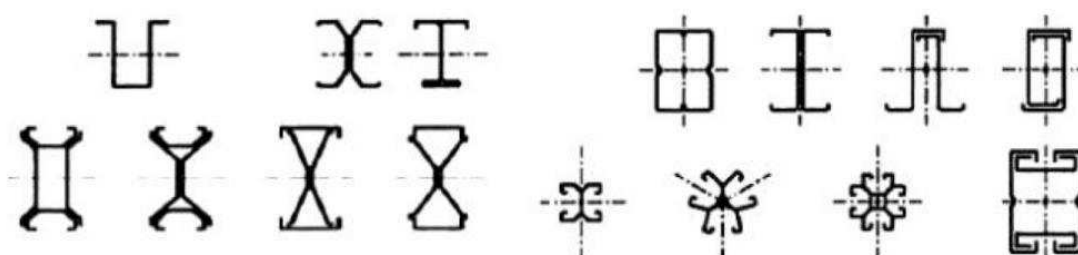


Рисунок 4 – Открытые и замкнутые сечения элементов конструкций из стальных тонкостенных, холодногнутых профилей

1.1.3 История развития теории тонкостенных конструкций

Теоретическая основа работы тонкостенных холодногнутых профилей была разработана в XX веке. Неоценимый вклад в развитие общей теории изгиба, кручения и устойчивости тонкостенных стержней произвольного открытого профиля внес С.П. Тимошенко С.П [4, 5]. Тимошенко вывел точное решение определения центра изгиба сечения. Работы С.П. Тимошенко стали основополагающими в исследованиях К. Вебера, Г. Вагнера, Ф. и Г. Блейхи. К. П.М. Знаменский и Г. Вагнер [6] независимо друг от друга вывели формулу для определения критической сжимающей силы при кручении. Развитие эмпирической формулы И. Ходкинсона и теоретических выводов Дж. Брайана задачи устойчивости сжатых прямоугольных пластин с различными граничными условиями, включая пластины с продольными ребрами жесткости, были подробно изложены в его исследованиях

Неоценимый вклад в теорию тонкостенных стержней внес советский ученый В.З. Власов. Он развил бесдвиговую теорию произвольно нагруженных тонкостенных стержней открытого профиля в 1930-х г.г.[7] Построенная им теория позволила дать исчерпывающее решение задачи об изгибно-крутильной форме потери устойчивости и колебаниях тонкостенных упругих стержней. Выкладки В.З. Власова были подтверждены экспериментально в руководимой им лаборатории А.К. Мроцинским, А.Р. Ржанициным, С.И. Стельмахом, Д.В. Бычковым.

Общая теория деформации тонкостенного стержня закрытого профиля была разработана А.А. Уманским, им же проанализирована работа стержней в закритической стадии. Работой тонкостенных стержней в закритической стадии также занимались Б.М. Броуде,[8] Г.Г. Голенко, А.В. Геммерлинг, Т. Карман, Л. Доннел, Э. Шехлер и другие. Конечные перемещения тонкостенных стержней исследовал и изложил в своих работах С.П. Вязьменский.[9, 10] Впоследствии

Е. А. Бейлин обобщил результаты исследований В.З. Власова, Б.М. Броуде, С.П. Вяземского. [11, 12]

Инженерный подход по учету местной потери устойчивости сечения путем «выключения» участков сечения из работы предложил Т. Карман, введя тем самым понятие «эффективного» сечения. Потеря формы сечения тонкостенного холодногнутого профиля, при которой местная потеря устойчивости стенок и полок сечения происходит одновременно, была отмечена в работах М.Л. Шарпа и экспериментах Д. Б. Двигхта. Вопросами местной потери устойчивости впоследствии занимался Т. Пекоч, Б.В. Шафер. Позднее их работы [13, 14] были связаны с оценкой влияния остаточных напряжений на несущую способность тонкостенного холодногнутого профиля. Исследованию потери формы сечения уделил особое внимание в своих работах Г.Д. Хенкок [15] совместно с Ю.Б. Квон [16] и С.К.В. Лау.[17] Последние работы Г.Д. Хенкока связаны с исследованием задач устойчивости на основе полуаналитического метода конечных полос. Вопросы потери формы сечения актуальны и сегодня, исследования проводятся на базе известных институтов.

Задачами численного моделирования тонкостенных стержней на основе метода конечных элементов, метода конечных полос в настоящее время занимаются Б.В. Шафер,[18] Г.Д. Хенкок,[19] Д. Камотим, К. Саад и другие.

За последние пятнадцать лет интерес молодых ученых к исследованию тонкостенных конструкций значительно усилился. Особое внимание привлекают исследования И.В. Астахова [20], И.Г. Катранова [21], А.Ю. Кузнецова [22], О.А. Тусниной [23], В.А. Рыбакова [24], А.Г. Холкина [25], В.М. Шишкина [26] и другие [27–36].

К числу современных зарубежных ученых, которые также сегодня исследуют вопросы работы тонкостенных холодногнутых конструкций, относятся К.Д.Р. Расмуссен, М. Хейнисуо, Х. Пастернак, Р. Ландольфо, Ф.М. Маццолани и другие. Результаты исследований последних лет изложены в пособиях и отчетах известных зарубежных институтов.

В настоящее время отечественными учеными, теоретиками и практиками, которые внесли большой вклад в развитие теории и занимаются решением задач поведения тонкостенного холодногнутого профиля, являются Э.Л. Айрумян [37,

38], А.Р. Туснин [39, 40], Г.И. Белый [41], В.В. Лалин [42], В.В. Егоров [43], В.В. Зверев [44] и другие.

В последние годы было проведено большое количество экспериментальных исследований холодногнутых профилей различного сечения [45–48]: двутавровых составных, С-образных, Z-образных, швеллерных, в том числе сплошных и перфорированных. Однако лабораторные испытания и теоретический анализ действительной работы балок из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения заполненных вспененным материалом не выполнялись.

Таким образом, в силу отсутствия экспериментально-теоретических данных по работе балок из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения, заполненных вспененным материалом тема исследования является актуальной.

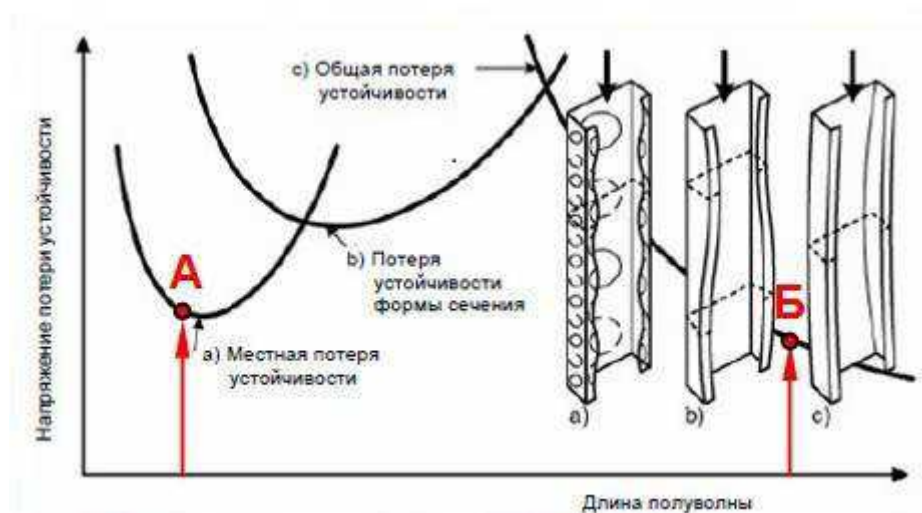
1.1.4 Потеря устойчивости. Местная потеря устойчивости

До середины XIX в. считалось, что если возникающие в элементе напряжения не превышают величины зависящей от механических свойств материала, то эксплуатационная надежность конструкции обеспечена. Однако появление конструкций, в состав которых входят длинные сжатые стержни, заставило пересмотреть укоренившуюся точку зрения. После изучения ряда произошедших аварий было установлено, что они произошли вследствие недостаточной устойчивости сжатых стержней.

Физическим признаком устойчивости или неустойчивости формы равновесия служит поведение нагруженной упругой системы при её отклонении от рассматриваемого положения равновесия на некоторую малую величину. Если система, отклоненная от положения равновесия, возвращается в первоначальное положение после устранения причины, вызвавшей отклонение, то равновесие устойчиво. Если отклонение не исчезает, а продолжает расти, то равновесие неустойчиво.

Для тонкостенных стержней существует три основные формы потери устойчивости: местная (локальная), потеря формы сечения, общая (рисунок 5).

Особенность работы тонкостенных стержней заключается в том, что исчерпание несущей способности может наступить как в результате потери общей устойчивости элемента, так и в результате другой формы потери устойчивости элемента.



- a) – Местная потеря устойчивости;
- b) - потеря формы сечения; c) – Общая потеря устойчивости.

Рисунок 5 – Формы потери устойчивости

При постепенном нагружении стержня из ЛСТК профиля осевой центральной силой для «коротких» стержней первым лимитирующим фактором будет местная потеря устойчивости (точка А), для «длинных» — общая изгибная форма потери устойчивости (точка Б). Поэтому после расчетов определяющей предельную силу и изгибной момент местной и дисторсионной потери устойчивости, следует выполнить проверку стержня на общую устойчивость. В Еврокоде 3 [49] сечение тонкостенного профиля рассматривается, как совокупность пластин с различными граничными условиями, устойчивость которых и определяется расчетами. Расчеты чрезвычайно громоздки особенно при наличии многочисленных элементов жесткости, и в реальной инженерной практике выполнять их очень сложно и трудоемко.

Суть расчетов заключается в определении эффективной (реально работающей) площади и эффективного момента сопротивления поперечного сечения ЛСТК профиля.

Проблемами общей и местной устойчивости тонкостенных стержней занимались многие ученые, основными считаются работы Блейха, Брезины, Колбруннера, Налешкевича и Вольмира.

Первоначально рассматривалось два случая потери устойчивости тонкостенного стержня: общая (самого стержня) и местная (его стенок). Потеря общей устойчивости может произойти при осевом сжатии, внецентренном сжатии, растяжении или изгибе стержня. Позднее исследователями было введено понятие «потеря формы сечения».

При сжатии стержней малой и средней длины проявляется наибольшее влияние кручения и возможность потери местной устойчивости стенок, которые чаще всего имеют контуры пластинок. При сжатии стержней большой длины - общая потеря устойчивости. Анализ ряда исследований показал, что одно и то же сечение тонкостенного стержня при разной длине стержня будет вести себя по-разному, то есть преобладающей будут различные формы потери устойчивости, и, наоборот, при одинаковой длине различные сечения будут иметь разные свойства. Например, в работах Блейха Ф., Вольмира А.С. и др. приводятся графики зависимости гибкости от длины, которые показывают, что местное выпучивание является решающим в стержнях длиной до 1,25 м вне зависимости от размеров сечения.

Также во многих работах показано, что изменение конфигурации сечения (например, добавление отгибов) резко увеличивает сопротивление местной потери устойчивости, но мало влияет на сопротивление изгибно-крутильной потери общей устойчивости и требует расчета с учетом «искажения» сечения. Получить общие зависимости гибкости и длины весьма затруднительно в связи с многообразием выпускаемого в настоящее время профиля.

Потеря местной устойчивости внешне проявляется в виде волнистости полки и выпучивании участков стенки. Как правило, потеря местной устойчивости в сжатой зоне сечения происходит на ранних стадиях нагружения, при уровне напряжений существенно ниже расчётных значений, но это не означает достижение профилем предельного состояния, сечение в целом остается работоспособным, имеет достаточный запас по несущей способности и может воспринимать внешнюю нагрузку.

1.2 Поиск и анализ материала для создания комбинированного элемента из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения

1.2.1 Применение вспененных материалов в легких стальных тонкостенных конструкция

Одним из основных достоинств ЛСТК является небольшой вес конструкций, поэтому в данной работе рассматривается возможность увеличения несущей способности без существенного увеличения общего веса конструкций за счет применения вспененных материалов.

Заполнение стальных и алюминиевых конструкций вспененными материалами активно применяется в области авиационного и автомобильного машиностроения, с целью повышения жесткости и прочности конструкций. [50, 51]

В статье Chung Kim Yuen and Nurick, [52] автор исследует стальные тонкостенные трубы на осевое сжатие с заполнением внутренней полости такими материалами как алюминиевая пена, два типа алюминиевых сот и пенополиуретан. Автор подчеркивает, что при заполнении стальных труб вспененным материалом происходит поглощение и перераспределение нагрузки, в результате чего увеличивается несущая способность. Так же автор отмечает, что жесткий пенополиуретан является наиболее эффективным заполнителем, и способствует наибольшему увеличению прочности конструкции.

Применению вспененного материала в качестве заполнителя для несущих строительных конструкций из стальных тонкостенных профилей коробчатого сечения непосредственно в сфере строительства посвящена работа David Camenish Gelder, [53] в которой проводятся натурный эксперимент стальных колон замкнутого сечения с заполнением внутренней полости пенополистиролом, а также численный эксперимент. Для эксперимента использовались готовые пенополистирольные вставки, соединенные с профилями с помощью клея. По результатам численного моделирования автор отмечает эффективность заполнителя, и подчеркивает, что наибольших результатов можно добиться, если процесс химического заполнения профилей вспененным материалом осуществить непосредственно в готовый профиль, что сделает конструкции более монолитной.

1.2.2 Материал для заполнения внутренней полости балки замкнутого сечения

В данной работе подбор вспененного материала для заполнения внутренней полости замкнутого профиля производился на основании ряда параметров, таких как долговечность материала, особенности монтажа, прочностные характеристики, адгезия с другими материалами, огнестойкость и т.д.

Предполагается, что высокая плотность вспененного материала уменьшит вмятие стенок составного сечения балки, а адгезия материала, за счет удержания стенок, будет препятствовать их выпучиванию, что увеличит устойчивость стенок и соответственно повысит несущую способность всей конструкции.

Так как в профиле материал будет скрыт, проследить за его поведением в ходе эксплуатации достаточно сложно. При этом важно, чтобы геометрические характеристики материала оставались в первоначальном состоянии, откуда следует вывод, что более предпочтительными являются материалы с наибольшими прочностными характеристиками, долговечные, устойчивые к перепадам температур, огнестойкие.

На основании выше сказанного для заполнения внутренней полости замкнутого сечения легких стальных тонкостенных оцинкованных профилей были рассмотрены два варианта газонаполненных пластмасс, такие как карбамидно-формальдегидный пенопласт (пеноизол) и пенополиуретан (ППУ). В настоящее время как пеноизол, так пенополиуретан в больших промышленных масштабах применяются в качестве утеплителя.

Пеноизол – это жидкий карбамидно-формальдегидный пенопласт, твердение которого происходит при достаточно невысокой температуре (всего +15С). Этот факт позволяет заливать пеноизол в стены зданий. Пеноизол имеет однородную мелкоячеистую структуру и хорошо принимает форму заполняемых пустот, практически исключая вероятность того, что останутся хоть какие-то незаполненные зоны. При этом его объём во время отвердевания не увеличивается, что освобождает от необходимости проведения дополнительных расчётов. Пеноизол не горит, и при плавлении под действием высоких температур не выделяет токсичных газов. Пеноизол является универсальным теплоизоляционным материалом, который получил развитие в 1930-х годах в Германии и очень активно применялся там, особенно в 50-е годы. В нашей стране этот материал имеет несколько названий, в зависимости от его производителя: пеноизол, мипора, юнипол, меттэмпласт.

Однако существует и ряд недостатков пеноизола. По причине усадки данного заполнителя с течением времени в нем могут образовываться сквозные трещины. Это является причиной снижения его свойств. Так же пеноизол обладает открытой пористой структурой, поэтому требует достаточно надежной защиты от влаги.

Достоинства пеноизола:

- экологичность;
- достаточно низкая температура отвердевания;
- не горит и не выделяет токсичных газов при плавлении;
- хорошо принимает форму пустот и не расширяется при отвердевании.

Недостатки пеноизола:

- при усадке могут появляться трещины;
- требует надёжной защиты от влаги.

Пенополиуретан является дальним родственником пеноизолов, поскольку также был открыт в Германии немецким химиком Байером, но уже в 1947 году.

Пенополиуретан – полимерный материал, являющийся разновидностью пластмассы. Он получается в ходе реакции двух, а иногда и более компонентов. Пенополиуретаны разделяют на жесткие, эластичные и интегральные. В данной работе рассматриваются именно жесткие пенополиуретаны, которые получили широкое распространение в строительстве как теплоизоляционные материалы. Жесткие пенополиуретаны также, как и пеноизолы имеют мелкоячеистую структуру. В отличие от пеноизола, жесткий пенополиуретан обладает более высокой плотностью – от 12 кг/м³ и выше, а также неплохой эластичностью, что делает его более прочным. Пенополиуретан не осыпается и не крошится.

Достоинства:

- высокая адгезия к разным материалам (металл, древесина, стекло, камень);
- высокие прочностные характеристики;
- высокая шумо- и теплоизоляция;
- экологичность (не содержит токсичные соединения);
- долговечность (срок службы 50 лет);
- устойчивость к перепадам температуры (актуально в климатических условиях России);
- не поддерживает горения.

Недостатки:

- относительно высокая стоимость;
- не устойчив к ультрафиолетовому излучению;

Сравним два этих материала по техническим параметрам.

Сравним материалы со стороны пожарной безопасности. Пеноизолы относятся к классу горючести Г2, т.е. к группе материалов, которые не способны к самостоятельному горению. Пенополиуретаны относятся к классу горючести Г3

и Г4 в зависимости от марки, которые являются трудногорючими и самозатухающими или горючими в зоне действия открытого огня.

Если сравнить два материала на взаимодействие с водой или паром, то пеноизолы обладают относительно высоким влагопоглощением – 18-20%, поэтому такие теплоизоляторы боятся влаги. Под действием избыточной влажности пеноизол разрушается, поэтому для такого материала требуется дополнительная паро- и влагоизоляция.

Пенополиуретаны обладают минимальным влагопоглощением за счет своей структуры с закрытой пористостью. Пенополиуретан будет дополнительной антикоррозийной защитой и защитой от влаги. На покрытиях из пенополиуретана исключено появление конденсата.

В плане физико-механических свойств пеноизол уступает пенополиуретану. Пеноизол не всегда актуален в плане применения теплоизоляционного материала, который может подвергаться механическому воздействию. Пенополиуретан достаточно прочный и эластичный материал, который может выдерживать усадку здания, ходьбу и прочие воздействия в зависимости от выбранной плотности пенополиуретана.

Морозостойкость пенополиуретана до 300 циклов, в то время как оптимальным температурным режимом для эксплуатации пеноизолов является от 0 до + 40 °С.

Основные технические показатели сравниваемых материалов сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические показатели пеноизола и пенополиуретана

Характеристики	Пеноизол	Пенополиуретан	Характеристики
1	2	3	1
Плотность, кг/м ³	10-25	12-300	Плотность, кг/м ³
Предел прочности, Мпа:	0,005-0,35	0,1-0,7	Предел прочности, Мпа:
На сжатие	0,01-0,25	0,15-1,0	На сжатие
На изгиб	0,05-0,08	0,1-0,6	На изгиб
На растяжение			На растяжение

Окончание таблицы 2

Характеристики	Пеноизол	Пенополиуретан	Характеристики
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	0,1-0,14	0,02 - 0,05	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)
Влагопоглощение, %	18-20	1-2,1	Влагопоглощение, %
Горючесть	Г2	Г3-Г4	Горючесть
Диапазон эксплуатационных температур, °С	От -50 до +80	От -100 до +100	Диапазон эксплуатационных температур, °С
Срок эксплуатации, лет	30	50	Срок эксплуатации, лет
Усадка, %	до 5	-	Усадка, %

* - Данные представленные в таблице являются усредненными показателями и на прямую зависят от производителя материала.

На основании сравнения пеноизола и пенополиуретана, в данной работе решено использовать для заполнения тонкостенной балки замкнутого сечения пенополиуретан, так как он обладает высокой плотностью, хорошей адгезией к различным материалам, не подвержен усадке и долговечен со сроком эксплуатации 50 лет.

Анализируя рынок пенополиуретановой продукции в г. Красноярск и оценивая возможности проведения эксперимента, выбран двухкомпонентный пенополиуретан марки ТУТАН. Применение однокомпонентного полиуретана, наиболее распространенного на рынке продукции, нецелесообразно, так как для его использования необходимо содержание влаги в воздухе для расширения, а при заполнении замкнутой балки данное условие трудно выполнимо, что приводит к образованию пустот и не полному заполнению полости балки. Применение наиболее сложных полиуретанов производится в больших промышленных объемах и не целесообразно на данной стадии эксперимента. Двухкомпонентный пенополиуретан марки ТУТАН является наиболее оптимальным вариантом, так как является саморасширяющимся, и химическая реакция происходит без доступа влаги, что позволяет использовать его при заполнениях в местах с ограниченным доступом воздуха.

Таблица 3 – Характеристика пенополиуретана марки ТУТАН

№	Основа	Полиуретановый полимер
1	Скорость отвердевания	6 минут
2	Структура пены	76 % закрытых ячеек
3	Плотность	Около 42 кг/м ³
4	Термостойкость	От -40 до +100 °С
5	Огнестойкость	B2
6	Водопоглощение	0,23 кг/м ²
7	Прочность при сдвиге	119 кПа
8	Прочность при растяжении	212 кПа
9	Прочность при сжатии	95 кПа
10	Удлинение при разрыве	25,5 %
11	Изменение линейных размеров	<5%

Свойства:

- Быстрое затвердение, независимо от уровня влажности в воздухе;
- Высокая стабильность (никакой усадки или последующей экспансии);
- Высокая сцепляемость к строительным поверхностям;
- Наполнение безопасное для окружающей среды.

1.3 Конструктивное решение скомбинированных элементов

Для образования несущих элементов с замкнутым сечением принято решение использовать разнополочные Σ -профиля толщиной 1,0 мм. Данные профиля имеют различную ширину полок B_1 и B_2 с учетом что:

$$B_1 = B_2 - 2 \cdot t,$$

где B_1 – ширина меньшей полки;

B_2 – ширина большей полки;

t – толщина металла профиля.

Для образования замкнутого коробчатого сечения два Σ -профиля расположены внутренней поверхностью друг к другу, и развернуты так, чтобы большая полка B_2 одного профиля при сопряжении располагалась над меньшей полкой B_1 другого профиля (Рисунок 6).[54, 55, 56]

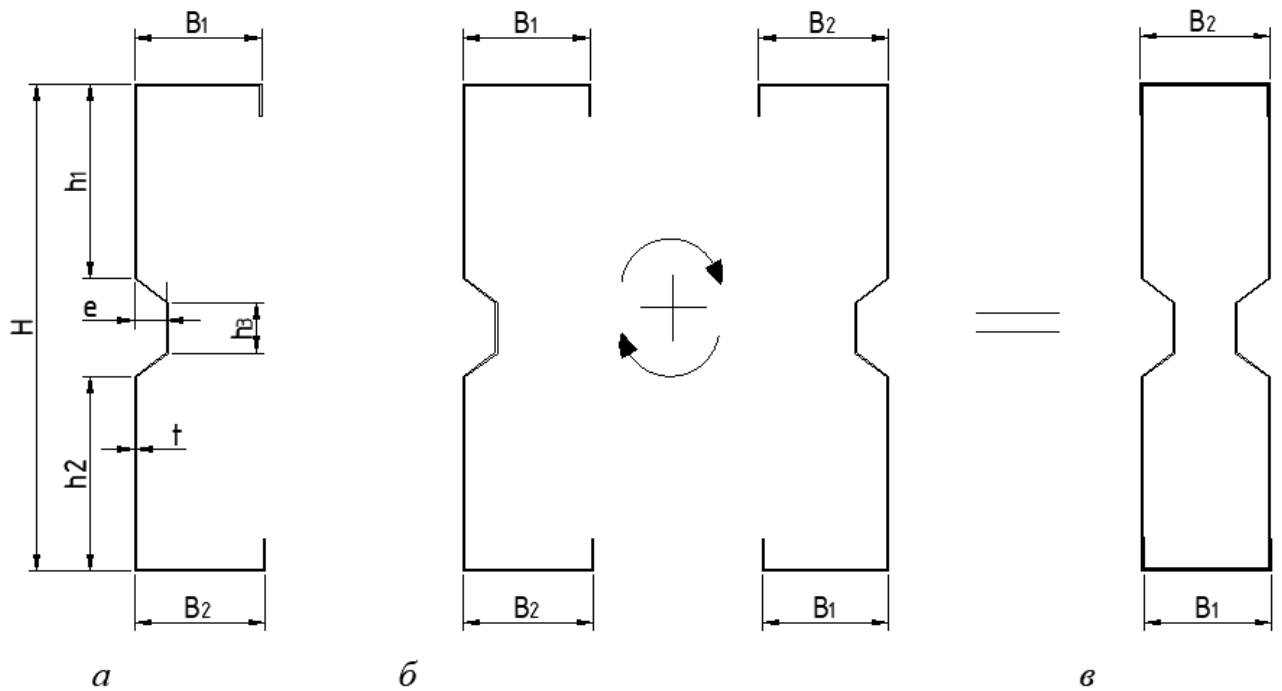


Рисунок 6 – Образование коробчатого сечения несущих элементов: а) – форма сечения Σ -профилей; б) – развернутые профили для образования коробчатого сечения; в) – коробчатое сечение несущих элементов

В данной работе для изготовления несущих элементов, балкок используются Σ -профиля со следующими параметрами: $B_1 = 78$ мм; $B_2 = 80$ мм; $H = 300$ мм; $h_1 = h_2 = 120$, $h_3 = 20$ мм; $t = 1$ мм;

Длина балок составного сечения принята с учетом соотношения 1/12 длины к высоте сечения. Длина балок $L = 6000$ мм. Между собой Σ -профиля скреплены вытяжными заклепками $d = 5$ мм, с шагом 250 мм (Рисунок 7).

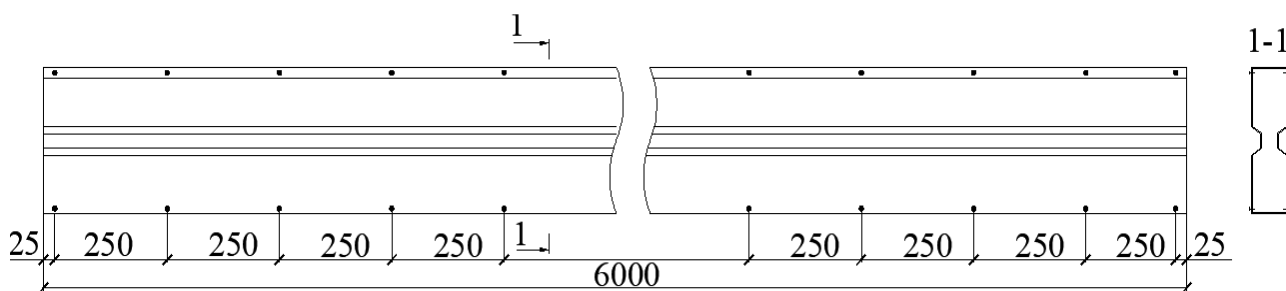


Рисунок 7. Балка составного сечения

1.4 Выводы по главе

Согласно результатам проведения обзора литературы, следует, что основная часть исследования заполнения вспененными материалами стальных и алюминиевых конструкций приходится на область авиационного и автомобильного машиностроения, в то время как в области строительных конструкций данное исследование является малоизученным. Поэтому изучение применения таких материалов, как легкие стальные тонкостенные конструкции является актуальной темой для исследования.

Для достижения цели исследования проведен анализ различных материалов таких как: ЛСТК и пенозаполнители. Представлены конструктивные решения образования замкнутого сечения разнополочных Σ -профилей со следующими параметрами: длина = 6000 мм, Ширина 80 мм, Высота 300 мм. Выполнено сравнение технических характеристик пеноизола и пенополиуретана, для заполнения балок замкнутого сечения. Для дальнейшей работы принят двухкомпонентный пенополиуретан марки ТУТАН, обладающий наилучшими характеристиками, такими как хорошая адгезия к различным поверхностям материала, отсутствие усадки и возможность заполнения различных форм.

Глава 2 Экспериментальное исследование адгезии пенополиуретана к металлу

В данной главе магистерской работы приведены данные об испытании по определению адгезии пенополиуретана к металлу.

Испытания проведены в лаборатории Сибирского федерального университета инженерно-строительного института в 2020 году.

Объектом испытаний является полиуретановая пена и стальной лист толщиной 1 мм. Для испытания изготавливаются образцы кубов (10x10x10 см) из полиуретановой пены, прикрепленных к стальному листу.

Цель экспериментальных исследований:

- изучение адгезии пенополиуретана к различным обработанным поверхностям стального листа.

Задачи экспериментальных исследований:

- определить адгезию пенополиуретана к различным обработанным поверхностям стального листа.
- сопоставить полученные результаты образцов;
- оценить эффективность адгезии к различным поверхностям, обработанного стального листа.

2.1 Образцы для экспериментального исследования адгезии пенополиуретана к металлу

Для определения наилучшей адгезии пенополиуретана к металлу, изготовлены кубы 10x10x10 см из пенополиуретана, прикрепленного к стальному листу из оцинкованного металла толщиной 1 мм (рисунок 8).



Рисунок 8 – Кубы 10x10x10 см из пенополиуретана, прикрепленного к стальному листу

Стальные листы изготовлены трёх видов:

1) лист, обработанный обезжиривателем (ТУ 0251-009-57859009-2015) (рисунок9.1)

2) лист, обработанный обезжиривателем и шлифовальным листом Р220, Р80, Р40 (рисунок9.2)

3) лист, обработанный обезжиривателем с отверстиями от просекателя (Просекатель Matrix 87951). Отверстия сделаны с шагом 1,5 см, диаметр отверстия 3 мм (рисунок9.3)

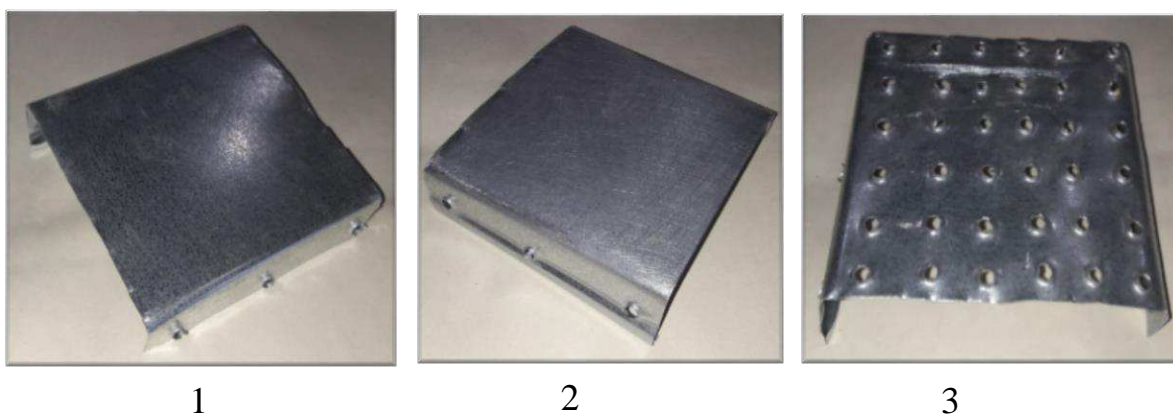


Рисунок 9 – образцы, изготовленные из стального оцинкованного листа

Подготовленные кубы закреплены на стенде и определены значения сопротивления отрыва (рисунок 10А) и среза (рисунок 10Б) металлического листа от пенополиуретана. Железобетонные блоки подвешивались на стальном тросе $\varnothing 1,5$ мм. Образцы загружались ступенчато с шагом 6 кгс. Испытания проведены до разрушения образцов.

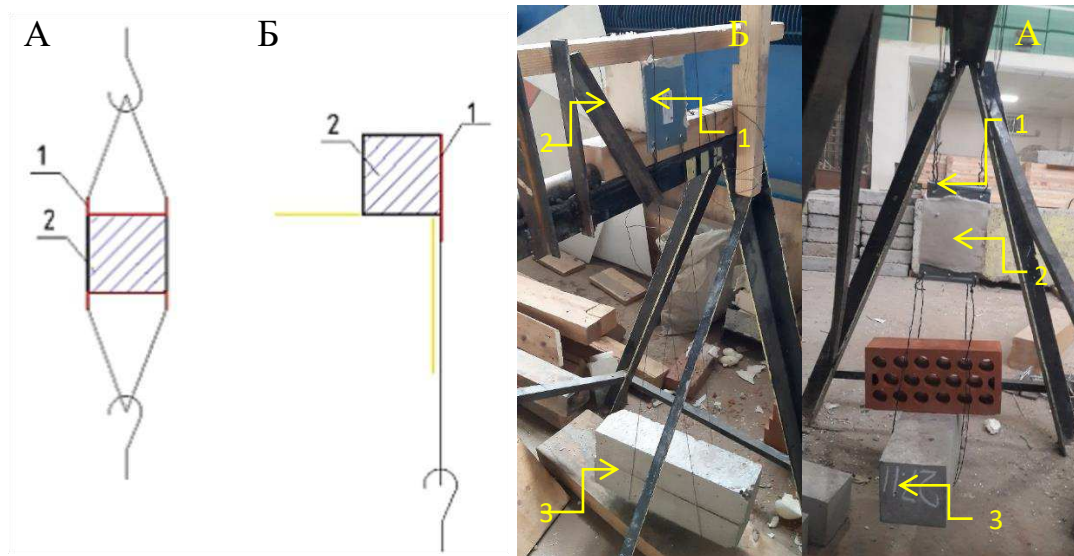


Рисунок 10 – расчетная схема установки

1) Стальной лист толщиной 1 мм; 2) Пенополиуретан; 3) Весовая нагрузка

Результаты испытания представлены в таблицах 4, 5 и на рисунках 11а и 12б.



Рисунок 11а – Испытания на срез



Рисунок 12б – Испытания на отрыв

Таблица 4 – Результаты испытаний на отрыв

Поверхность металла обработана обезжиривателем			
Поз.	Тип образца	Нагрузка, кгс	Напряжение, кгс/см ²
1	1А	21	0,21
2	2А	23	0,23
3	3А	18	0,18
Поверхность металла обработана обезжиривателем и шлифовальным листом			
4	1Б	34	0,34
5	2Б	39	0,39
6	3Б	29	0,29
Поверхность металла обработана обезжиривателем и сделаны отверстия с помощью просекателя			
7	1В	16	0,16
8	2В	23	0,23
9	3В	18	0,18

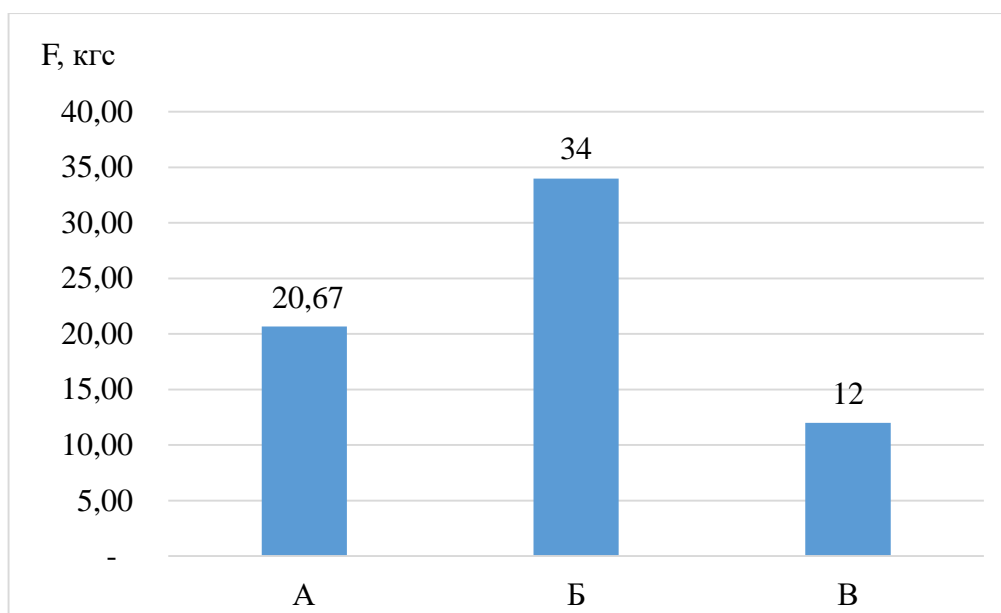


Рисунок 13 – Гистограмма численных результатов испытаний на отрыв

Таблица 5 – Результаты испытаний на срез

Поверхность металла обработана обезжиривателем			
Поз.	Тип образца	Нагрузка, кгс	Напряжение, кгс/см ²
1	1Г	16	0,16
2	2Г	21	0,21
3	3Г	18	0,18
Поверхность металла обработана обезжиривателем и шлифовальным листом			
4	1Д	32	0,32
5	2Д	39	0,39
6	3Д	42	0,42
Поверхность металла обработана обезжиривателем и сделаны отверстия с помощью просекателя			
7	1Е	65	0,65
8	2Е	46	0,46
9	3Е	46	0,46

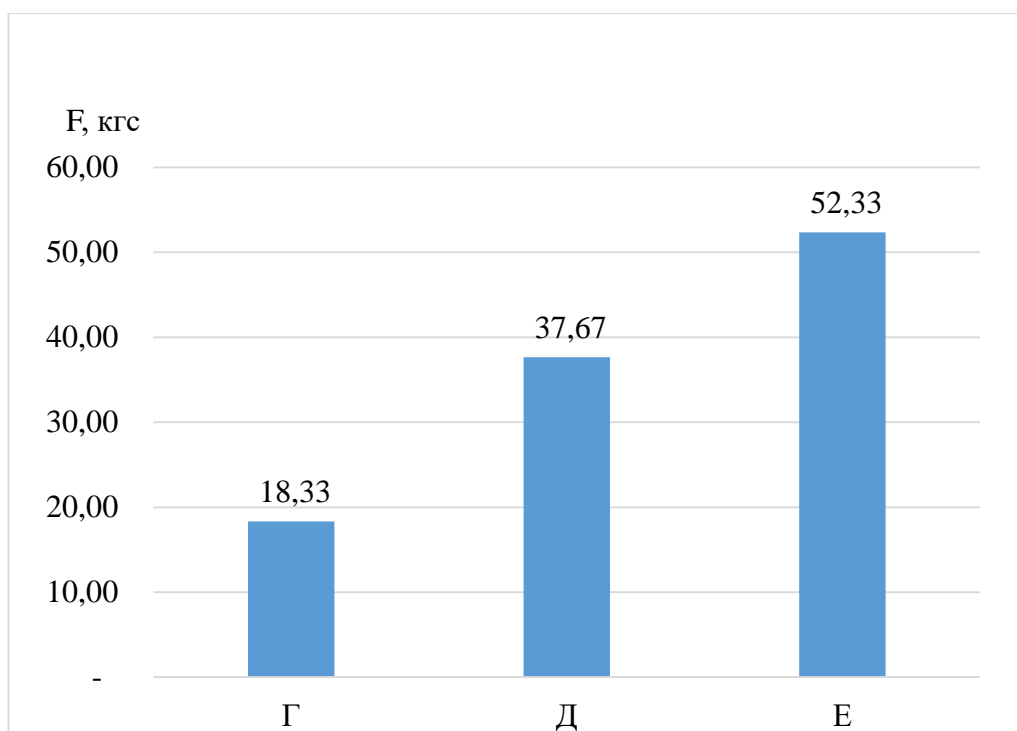


Рисунок 14 – Гистограмма численных результатов испытания на срез

2.2 Выводы по главе

В результате натурных испытаний наиболее эффективным для наилучшей адгезии при испытании на отрыв стал образец, обработанный шлифовальным листом, показатели которого составили 34 кгс. По данным, полученным при испытании на срез, наилучший результат показал образец с отверстиями и составил 52,33 кгс. Так как образец с отверстиями имеет меньшую площадь адгезии, для дальнейшего испытания балки из ЛСТК замкнутого сечения принимаем поверхность обработанную шлифовальным листом.

Глава 3 Численное исследование балок из стальных тонкостенных Σ -профилей замкнутого сечения

В третьей главе магистерской работы представлены результаты экспериментально-теоретических исследований балок из тонкостенных Σ -профилей составного сечения с заполнением внутренней полости пенополиуретаном на основе конечно-элементного моделирования.

Исследования, базирующиеся только лишь в теоретических утверждениях, считаются приближенными и трудоемкими. Полученные данные путем экспериментальных исследований, дают более точные результаты, однако опытные модели по сути однократные более того для изготовления экспериментальных образцов требуются большие финансовые затраты. Благодаря современным программам численного расчета значительно сокращаются сроки проведения исследования с более точными результатами. Для получения наиболее точных данных в данной магистерской работе используется программный комплекс ANSYS.

Цель численных исследований:

- определение несущей способности тонкостенных балок с заполнением внутренней полости пенополиуретаном.

Задачи численных исследований:

- определить несущую способность полых составных балок и с заполнением внутренней полости пенополиуретаном;

- проанализировать численное исследование и сравнить результаты балок из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения как пустотелых, так и с заполнением внутренней полости пенополиуретаном;

- оценить эффективности заполнения балок пенополиуретаном.

Конечно-элементное моделирование было выполнено с использованием программного комплекса ANSYS. Выбор программного комплекса был обоснован возможностью моделирования стальных профилей составного сечения и их взаимодействия как между собой, так и с заполнителем в виде пенополиуретана.

3.1 Численное моделирование

Конечно-элементное моделирование выполнено с использованием модуля «Static Structural», который интегрирован в систему пространственного проектирования ANSYS. Данный программный комплекс ориентирован на моделирование и расчет с использованием объемных конечных элементов. Конечно-элементные модели из объемных элементов обеспечивают более точный учет геометрии профилей ЛСТК по сравнению с моделями из пластинчатых элементов.

Моделью исследования является однопролетная балка с шарнирными опорами, из оцинкованных тонкостенных холодногнутых разнополочных Σ -профилей замкнутого сечения (рисунок 15).

Схема закрепления и загрузки образца показана на рисунке 7.

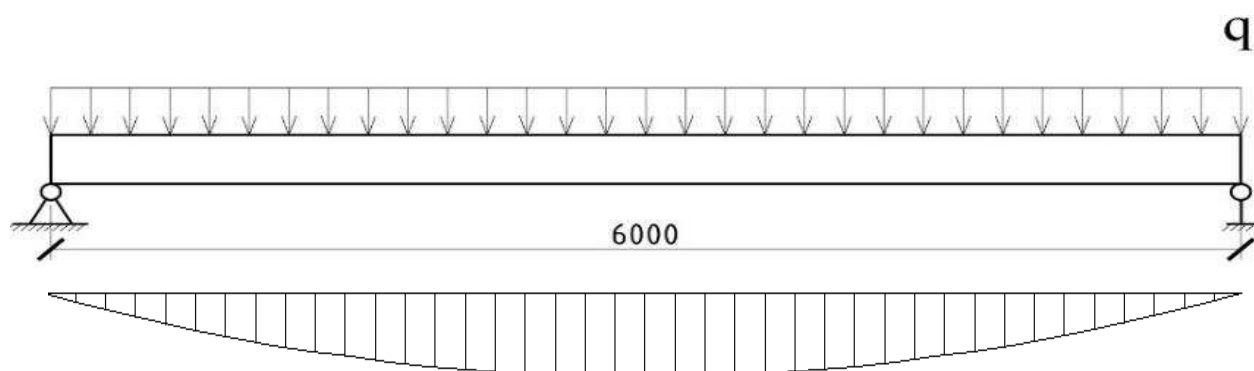


Рисунок 15 – Схема закрепления и загрузки образца

Для описания расчетной модели используется терминология, применяемая в программном комплексе ANSYS. Геометрическая модель профилей балки реализована в модуле «SpaceClaim». Конечно-элементная модель построена на основании геометрической путем инструмента «калибровка» разбиения модели на объемные конечные элементы тетраэдральной топологии. Выбор объемных конечных элементов обусловлен необходимостью моделирования контакта профилей составного сечения как между собой, так и с наполнителем в виде пенополиуретана.

Разбиение сетки выполнено отдельной сеткой для каждого элемента на основе кривизны высокого качества, что позволяет более точно изучить поведение модели, но приводит к значительному повышению вычислительных затрат. Тип контакта профилей, образующих составное замкнутое сечение балки, задан параметром «связанный» а тип контакта для внутренней полости профилей с пенополиуретаном задан «связанный» применяемый в качестве адгезии пенополиуретана к стали. [57 – 59]

Для повышения точности расчета контактной задачи использован параметр «большие перемещения», который позволяет учитывать изменение геометрии поверхности при нагружении конструкции и соответственно направления реакций сил трения.

3.2 Определение значения критического напряжения потери устойчивости

При определении несущей способности и жесткости холодногнутых профилей следует учитывать влияние потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения как это показано для случаев, приведенных на рисунке 16.

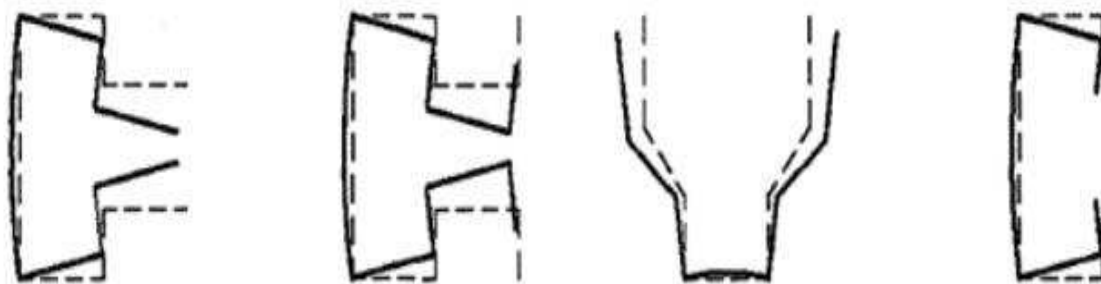


Рисунок 16 - Примеры потери устойчивости формы сечения

Расчетное значение критического напряжения, при котором происходит потеря местной устойчивости стенки, определено на основании результатов решения задач устойчивости прямоугольных пластинок, имеющих различные граничные условия [60, 61, 62].

Для обеспечения местной устойчивости участков профиля, работающих в упругой области, при действии нормальных напряжений по краям в общем виде должно выполняться условие:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{cr}, \quad (1)$$

где σ_{max} – наибольшее сжимающее напряжение;

σ_{cr} – критическое напряжение.

Критическое напряжение, соответствующее потере устойчивости пластинки шириной h и толщиной t определяется по формуле:

$$\sigma_{cr} = \frac{k\sigma(\pi^2 * E)}{12 * (1 - \nu^2)} * \left(\frac{t}{h}\right)^2 \quad (3)$$

где $k\sigma$ – параметр, определяющий критическое состояние пластинки;

E – модуль упругости;

ν – коэффициент Пуассона;

t – толщина металла стенки;

h – расчетная высота стенки.

Параметр, определяющий критическое состояние пластины принят $k\sigma=4$, что соответствует наихудшему условию работы, изолированной шарнирно опертой по краям пластинки.

При расчете стенки сжато-изогнутой балки на устойчивость должно выполняться условие:

$$\sigma_{max} \leq \gamma\tau * \sigma_{cr}, \quad (4)$$

где $\gamma\tau$ – коэффициент, учитывающий наличие касательных напряжений по краям расчетной пластинки.

Таким образом критическое напряжение равно:

$$\sigma_{cr} = \frac{4 * (3,14^2 * 2,06 * 10^5)}{12 * (1 - 0,32)} * \left(\frac{1}{120}\right)^2 = 51,6 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{max} \leq \gamma_{\tau} * \sigma_{cr},$$

$$\sigma_{max} \leq 0,9 * 51,6 = 46,4 \text{ МПа.}$$

Целью численных расчетов:

- определить предельную нагрузку на пустотелые и заполненные балки при которых максимальные напряжения достигают, но не превышают расчетное значение критического напряжения в центре балки, при котором происходит потеря местной устойчивости и, следовательно, потеря несущей способности.

3.3 Результаты численного расчета

Расчет балки выполнен в геометрически нелинейной постановке. Численная модель представлена на рисунке 17, свойства материалов представлены в таблице 6. Свойства пенополиуретана определены в соответствии с техническими данными от производителя и на основании исследований механических характеристик пенополиуретана [63, 64].

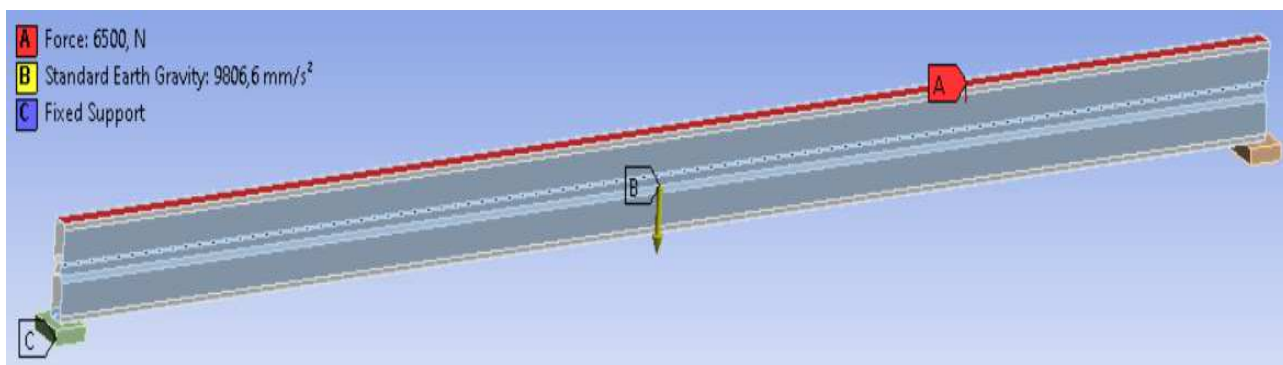


Рисунок 17 – Численная модель балки

Таблица 6 – Свойства материалов численной модели

Материал	Плотность, кг/м ³	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Сталь	7850	240	2,06·10 ⁵	0,3
Пенополиуретан	42	12	61	0,25

Результаты расчета численной модели пустотелой ЛСТК балки и с наполнителем в виде пенополиуретана сведены в таблицу 7 и представлены на рисунке 23.

Несущая способность каждой балки соответствует нагрузке, при которой максимальные напряжения в стенке не превысили расчетное критическое напряжение (рисунок 24):

$$\sigma_{\max} \leq 46,4 \text{ МПа.}$$

Таблица 7 – Результаты расчета численной модели

Поз.	Тип образца	Нагрузка, кгс	Прогиб, мм	Напряжение, МПа	Несущая способность, кгс
1	БП	50	1,06	6,65	650
		100	1,62	9,6	
		150	2,18	12,32	
		200	2,73	15,43	
		250	3,29	18,57	
		300	3,84	21,71	
		350	4,4	24,86	
		400	4,96	27,94	
		450	5,51	31,12	
		500	6,07	35,26	
		550	6,62	38,36	
		600	7,18	43,54	
		650	7,74	47,9	
		700	7,99	51,1	
		750	8,41	53,41	
		2	БЗ	50	
100	1.26			9.22	
150	1.68			12.25	
200	2.09			15.28	
250	2.5			18.3	
300	2.9			21.33	
350	3.34			24.36	
400	3.76			27.38	
450	4.17			30.41	
500	4.59			33.43	
550	5			36.46	
600	5.42			39.49	
650	5.84			42.51	
700	6.25			45.54	

Окончание таблицы 7

		750	6.6	48.57	
		800	7.08	51.59	
		850	7.5	54.62	
		900	7.9	57.64	
Увеличение несущей способности					27,7%

* ЗП заполненная балка; ПБ пустотелая балка

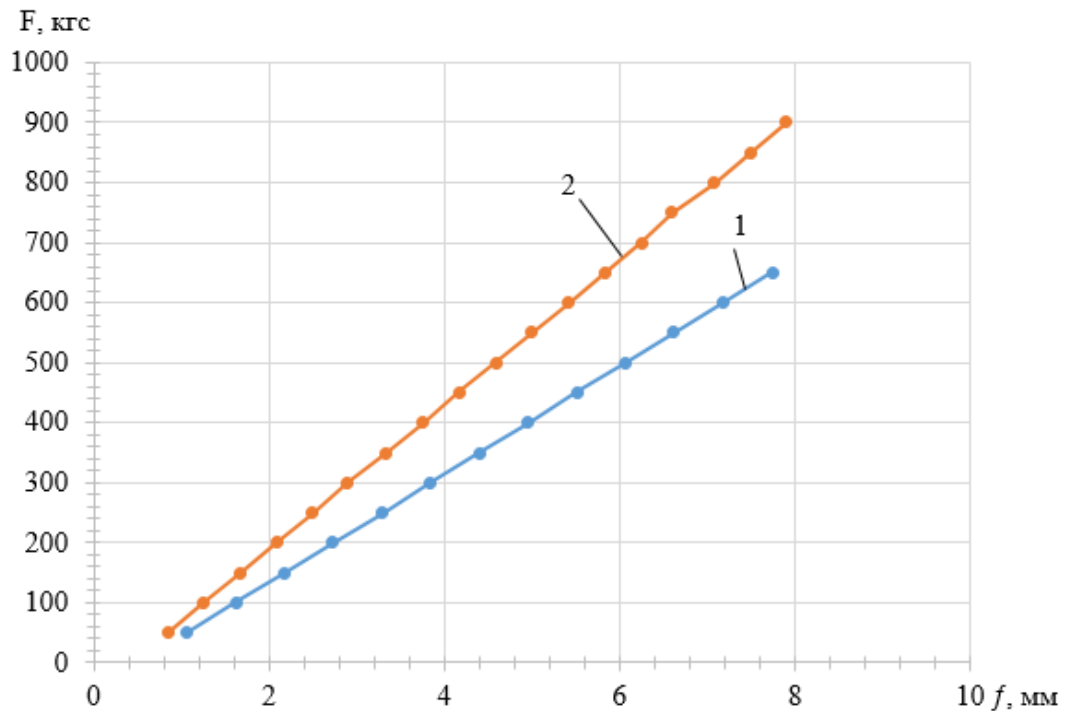


Рисунок 18 – Диаграмма результатов численного расчета:

1- ПБ; 2- ЗБ;

Согласно формуле 3 теоретическое напряжение потери устойчивости стенки балки составило 46,4 МПа. Методом ступенчатого нагружения пустотелой балки при нагрузке 650 кг·м, достигнуто предельное значение потери устойчивости в центральной части балки. Значение прогиба при этом составило 7,74 мм. При том же напряжении заполненной балки, нагрузка составила 750 кг·м, значения прогиба при этом 6,6 мм.

Предел текучести стали 240 МПа, что в 5 раз больше, чем расчетное значение потери устойчивости. Для снижения недоиспользования материала было принято решение, догружать заполненную балку до значений, равных значениям прогиба пустотелой балки. Таким образом, напряжение в заполненной балке составило 900 кг·м, при напряжении 57,64 МПа.

Анализ полученных предельных нагрузок на основании численного расчета показывает, что заполнение внутренней полости замкнутого сечения балок пенополиуретаном приводит к увеличению местной устойчивости стенок балки и, следовательно, к увеличению несущей способности на 27,7%. Из рисунка 21, 22 следует, что заполнение балки пенополиуретаном способствует равномерному перераспределению напряжения, в то время как пустотелая балка имеет неравномерное распределение напряжения.

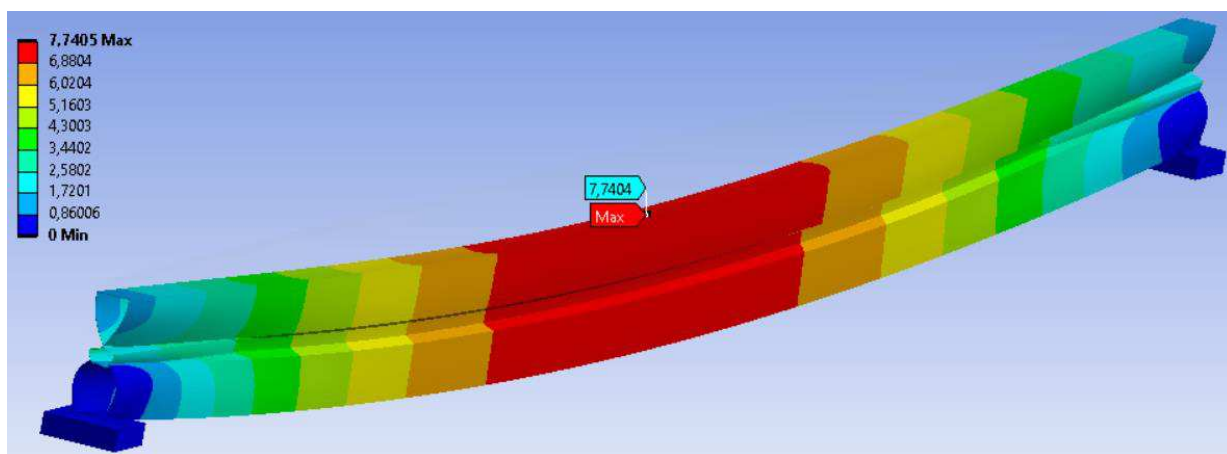


Рисунок 19 – Эпюра деформации пустотелой балки

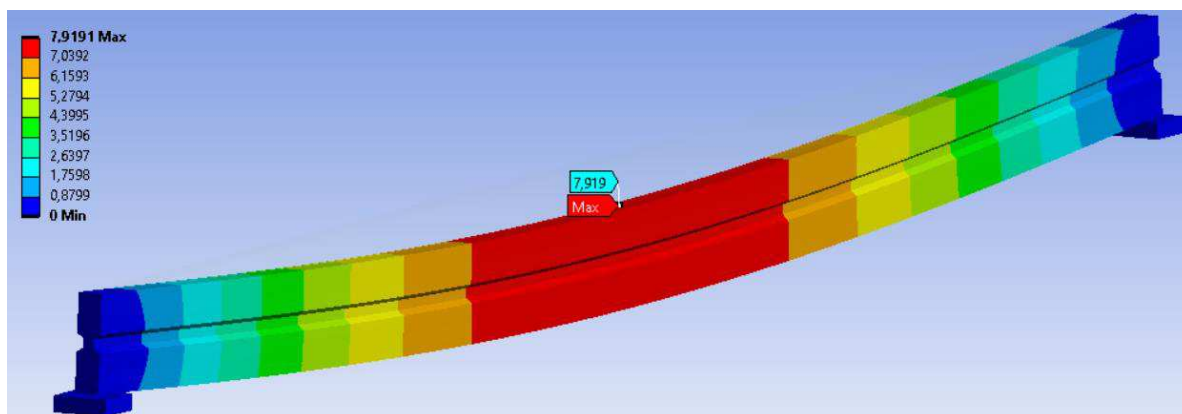


Рисунок 20 – Эпюра деформации заполненной балки

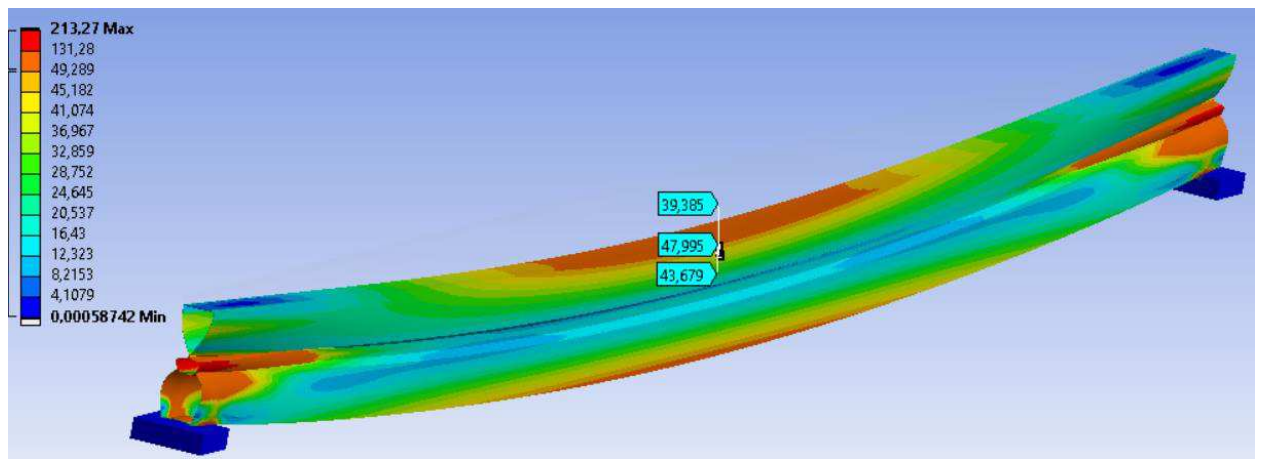


Рисунок 21 – Эпюра напряжений пустотелой балки

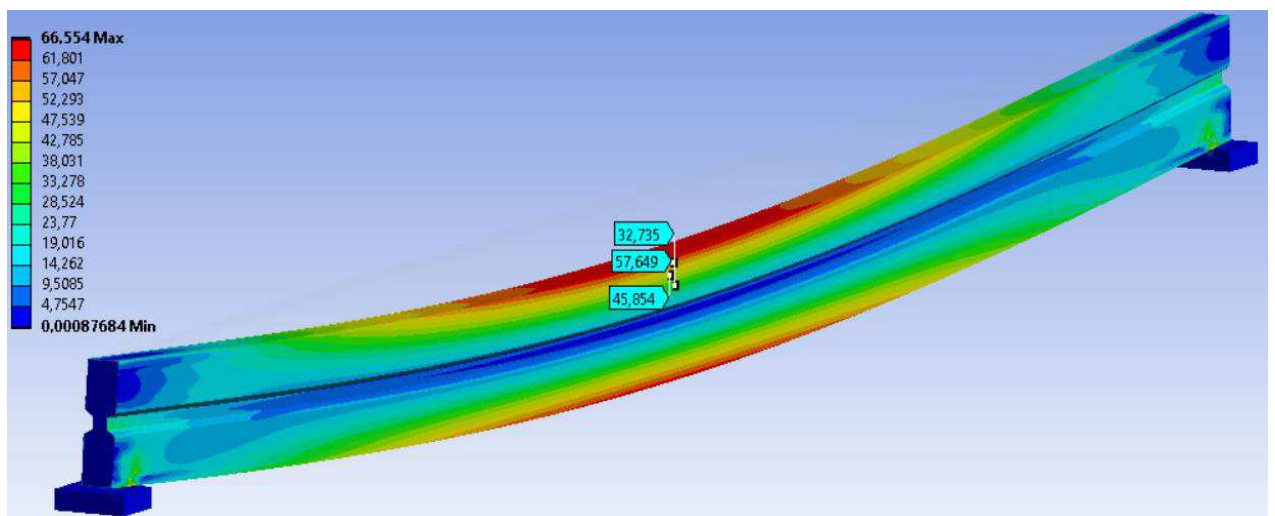


Рисунок 22 – Эпюра напряжений заполненной балки

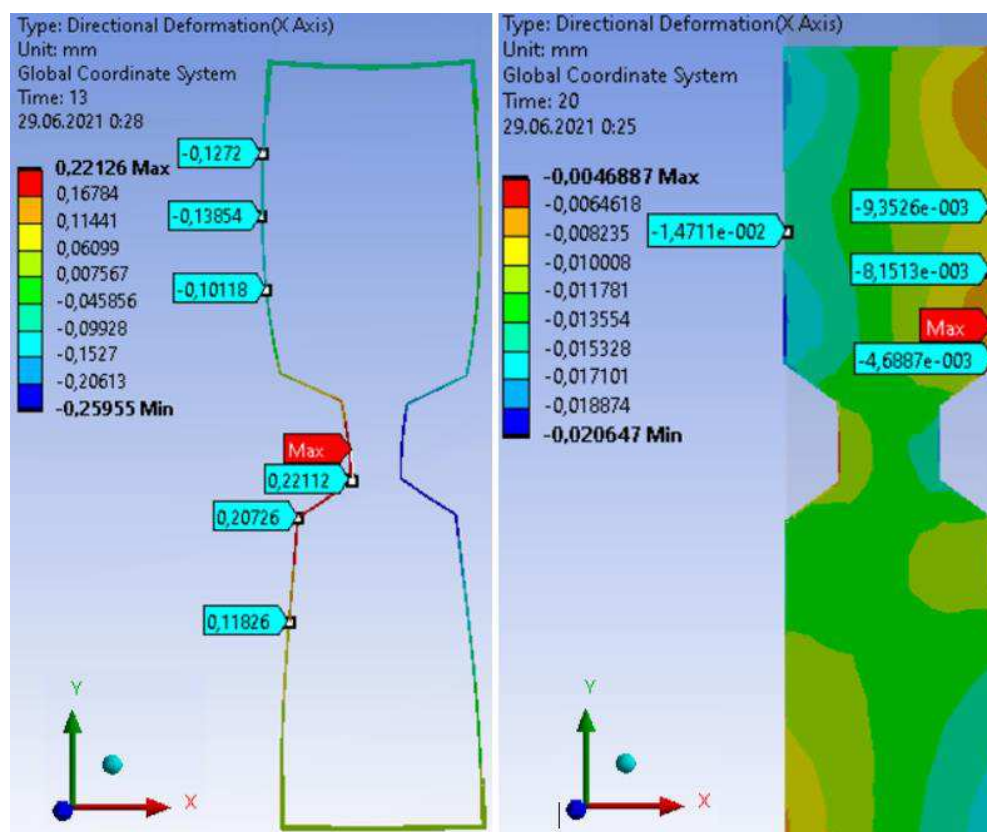


Рисунок 23 – Эпюра деформации пустотелой балки и
заполненной балки по оси x

3.4 Выводы по главе

В данной главе представлены численные расчеты с помощью программного комплекса ANSYS.

Анализ полученных предельных нагрузок на основании численного расчета показывает, что заполнение внутренней полости замкнутого сечения балок пенополиуретаном приводит к увеличению местной устойчивости стенок балки и, следовательно, к увеличению несущей способности на 27,7%. Из рисунка 21, 22 следует, что заполнение балки пенополиуретаном способствует равномерному перераспределению напряжения, в то время как пустотелая балка имеет неравномерное распределение напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Легкие стальные тонкостенные конструкции обладают рядом преимуществ перед традиционными конструкциями из горячекатаного проката:

- снижение расхода металла, эффективное использование сталей повышенной прочности;
- снижение расходов на устройство фундаментов за счет снижения веса конструкций;
- снижение трудозатрат, возможность монтажа без применения кранов и других грузоподъемных механизмов;
- уменьшение сроков монтажа;
- экономия затрат на транспортировку конструкций, как за счет облегчения конструкций, так и за счет их компактности.

Небольшой вес ЛСТК дает основное преимущество по сравнению с другими строительными конструкциями. На основании этого, в данной работе была рассмотрена возможность увеличения несущей способности ЛСТК без существенного увеличения веса самой конструкции в целом.

В качестве объекта исследования была выбрана балка, из стальных тонкостенных разнополочных Σ -профилей, замкнутого сечения с заполнением внутренней полости пенополиуретаном. Были проведены численные исследования балок на изгиб с использованием программного комплекса ANSYS.

Целью работы являлось определение несущей способности балок из стальных холодногнутых оцинкованных профилей замкнутого сечения заполненных вспененным материалом.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) Провести анализ материала для создания комбинированного элемента из стального тонкостенного профиля замкнутого сечения с заполнением внутренней полости.
- 2) Определить адгезию пены к металлу.

3) Выполнить численное исследование балок из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения как пустотелых, так и с заполнением внутренней полости вспененным материалом.

4) Произвести анализ численных результатов для дальнейшего испытания конструкции из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения как пустотелых, так и с заполнением внутренней полости вспененным материалом и оценить эффективность принятого конструктивного решения.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- Заполнение стальных тонкостенных конструкций различными вспененными материалами активно применяется в области авиационного и автомобильного машиностроения, с целью повышения жесткости и прочности конструкций, но является неизученным вопросом в области строительных конструкций. В ходе исследований, выполненных в данной работе установлены зависимости, подтверждающие эффективность применения вспененных материалов в области ЛСТК, которые требуют дальнейших исследований.

- В результате натурных испытаний наиболее эффективным для наилучшей адгезии при испытании на отрыв стал образец, обработанный шлифовальным листом, показатели которого составили 34 кгс. По данным, полученным при испытании на срез, наилучший результат показал образец с отверстиями и составил 52,33 кгс. Так как образец с отверстиями имеет меньшую площадь адгезии, для дальнейшего испытания балки из ЛСТК замкнутого сечения принимаем поверхность, обработанную шлифовальным листом.

- В результате анализа полученных предельных нагрузок на основании численного расчета показывает, что заполнение внутренней полости замкнутого сечения балок пенополиуретаном плотностью 42 кг/м^3 приводит к увеличению местной устойчивости стенок балки и, следовательно, к увеличению несущей способности на 27,7%. Заполнение балки пенополиуретаном способствует равномерному перераспределению напряжения, в то время как пустотелая балка имеет неравномерное распределение напряжения. Кроме того, известные теоретические и экспериментальные предпосылки [69] свидетельствуют о повышении

несущей способности аналогичных балок за счет повышения устойчивости стенок, однако данные положения почти не поддаются надежному численному исследованию без экспериментальных данных. Поэтому, дальнейшие исследования и верификацию полученных результатов планируется осуществить натурными испытаниями конструкций.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ЗП заполненная балка

ПБ пустотелая балка

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Павлов А.Б. Быстровозводимые малоэтажные жилые здания с применением легких стальных тонкостенных конструкций / А.Б. Павлов, Э.Л. Айрумян, С.В. Камынин, Н.И. Каменщиков // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. - №9. – С. 53-51.

2 Рыбаков В.А. Основы строительной механики легких стальных тонкостенных конструкций: учебное пособие / СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. -207 с.

3 СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутой оцинкованных профилей и гофрированных листов. [Текст] – М.,2016.

4 Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций. М.: Наука, 1975. 704 с.

5 Тимошенко С.П. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 575 с.

6 Wagner, C. und Pretscher, W. Verdrehung und Knickung von offenen Profilen // Luftfahrtforschung, № 6, 1934. pp. 174-80.

7 Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни / В.З. Власов .- 2-е изд., перераб. и доп .- Москва: Физматлит, 1959 .- 568 с.

8 Броуде Б.М. О закритическом поведении гибких стенок стальных стержней / Б.М. Броуде // Строительная механика и расчет сооружений. 1976. - № 4. - с.7

9 Вязьменский С.П. Приближённое решение задачи о расчёте прямолинейных упругих стержней по деформированному состоянию / С.П. Вязьменский // Механика стержневых систем и сплошных сред. Л., 1966. - Вып.49. - с.268-285.

10 Вязьменский С.П. О граничных условиях в теории тонкостенных стержней / С.П. Вязьменский // Механика стержневых систем и сплошных сред. Л., 1969. - Вып.60. - с.20-29.

11 Бейлин Е.А. Элементы теории кручения тонкостенных стержней произвольного профиля / Е.А. Бейлин // СПб., 2003. – с. 113.

12 Бейлин Е.А. Статика и динамика тонкостенных криволинейных стержней произвольного профиля / Е.А. Бейлин // Известия вузов.Строительство. 1997.- №7,- с. 19-26.

13 Schafer, B.W. and Peköz, T. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses // Journal of Constructional Steel Research, 47(3), 1998. pp.193-210.

14 Weng, C.C., Peköz, T., Teoman. Residual stresses in cold-formed steel members // Journal of structural engineering New York, N.Y., 116 (6), 1990, pp. 1611-1625.

15 Hancock, G.J. Cold-formed steel structures // Journal of Constructional Steel Research, Volume 59, Issue 4, April 2003. pp. 473-487.

16 Kwon, Y. B. and Hancock, G. J. Tests of cold-formed channel with local and distortional buckling // Journal of structural engineering, 118(7), 1992. pp. 1786-1803.

17 Lau, S.C.W., Hancock, G. J. Distortional buckling formulas for channel columns // Journal of structural engineering, New York, N.Y., 113 (5), 1987, pp. 1063-1078.

18 Schafer, B.W. Cold-formed steel behavior and design: analytical and numerical modeling of elements and members with longitudinal stiffeners, PhD dissertation, Cornell Univ., Ithaca, N.Y., 1997.

19 Papangelis, J.P., Hancock, G.J. Computer analysis of thin-walled structural members // Computers and Structures, №56 (1), 1995, pp. 157-176.

20 Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб., 2006. 24 с.

21 Катранов И.Г. Несущая способность винтовых и заклепочных соединений стальных тонкостенных конструкций: автореф. дис. канд. тех. наук. М., 2011. 202 с.

22 Кузнецов А.Ю. Прочность и пространственная устойчивость составных стержневых элементов конструкций из холодногнутых профилей: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб, 2013. 25 с.

23 Туснина О.А. Несущая способность тонкостенных холодногнуто́тых прогонов покрытия с учетом влияния жесткости соединения с сэндвич-панелями: дис. канд.тех. наук. 2015. 168 с.

24 Рыбаков В.А. Применение полусдвиговой теории В.И. Сливкера для анализа напряженно-деформированного состояния систем тонкостенных стержней: автореф. дис. канд. тех. наук. СПб., 2012. 184 с.

25 Холкин А.Г. Исследование местной устойчивости тонкостенных трапециевидных профилей при продольно-поперечном изгибе: автореф. дис. канд. тех. наук. Омск, 2010. 118 с.

26 Шишкин В.М. Разработка эффективных методов расчета тонкостенных конструкций с учетом пластических и демпфирующих свойств материала: дис. докт. тех. наук. Казань, 2008. 440 с.

27 Жилкин В.А. Численный расчет тонкостенных стержней открытого профиля в MSC Patran-Nastran // Вестник ЧГАА. 2013. №65. С. 84–95. __

28 Кикоть А.А., Григорьев В.В. Влияние ширины пояса и параметров стенки на эффективность стального тонкостенного холодногнутого профиля Сигма-образного сечения при работе на изгиб // Инженерно-строительный журнал. 2013. №1(36). С. 97–102.

29 Колесов А.И., Лапшин А.А., Валов А.В. Современные методы исследования тонкостенных стальных конструкций // Проволжский научный журнал. 2007. №1. С. 28–33.

30 Недвига П.Н., Рыбаков В.А. Эмпирические методы оценки несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой // Инженерно-строительный журнал. 2009. №8(10). С. 27–30.

31 Саламахин С.В., Синельников А.С. Моделирование узла винтового соединения тонкостенных стальных перфорированных профилей методом конечных элементов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №4(9). С. 53–63.

32 Смазнов Д.Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3(5). С. 42–49.

33 Туснин А.Р., Прокич М. Прочность двутавровых профилей при стеснённом кручении с учётом развития пластических деформаций // Вестник МГСУ. 2014. №1. С. 75–82.

34 Шатов Д.С. Конечно-элементное моделирование перфорированных стоек открытого сечения из холодногнутых профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3 (21). С. 32–35.

35 Vatin N.I., Havula J., Martikainen, L., Sinelnikov A.S., Orlova A.V., Salamakhin S.V. Thin-walled crosssections and their joints: tests and FEM-modelling // Advanced Materials Research. 2014. Vols. 945–949. Pp. 1211–1215.

36 Ведяков И.И., Соловьев Д.В., Одесский П.Д. Несущая способность болтовых соединений легких конструкций из холодногнутых профилей малых толщин // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №10. С. 19–22.

37 Айрумян Э.Л. Исследования действительной работы тонкостенных холодногнутых прогонов из оцинкованной стали // Промышленное и гражданское строительство (ПГС): Ежемесячный научно-технический и производственный журнал / Российское общество инженеров строительства; Российская инженерная академия.- М., 2002.- №6.- с. 31- 34.

38 Айрумян, Э. Л. Особенности расчета стальных конструкций из тонкостенных гнутых профилей [Текст] / Э. Л. Айрумян // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2008. – №3. – С. 2–7.

39 Туснин А.Р. Конечный элемент для численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля / А.Р. Туснин // Металлические конструкции.- Киев, 2009.- №1(15). - с. 73-78

40 Туснин, А.Р. Расчет и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля [Текст]: дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.01 / Туснин Александр Романович. - М., 2003. - 353 с.

41 Белый, Г.И. Пространственная работа и предельные состояния стержневых элементов металлических конструкций Текст. : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 : защищена 16.06.1988 / Белый Григорий Иванович. -Л., 1987. 464 с. : ил. - Библиогр.: с. 248-278.

42 Лалин В.В. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем / В.В. Лалин, В.А. Рыбаков, С.А. Морозов // Инженерно-строительный журнал: научно-прикладное издание: специализированный научный журнал / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. - СПб., 2012. - № 1 (27). - с. 53-73.

43 Егоров, В.В. Свободные колебания тонкостенных криволинейных стержней произвольного профиля, нагруженных параметрической нагрузкой [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.17 / Егоров Виктор Валентинович. – СПб., 2001. - 127 с.

44 Зверев, В.В. Эффективные строительные металлоконструкции на основе объемно-формованного тонколистового проката: исследование, проектирование, изготовление [Текст]: автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.01 / Зверев Виталий Валентинович. – Липецк, 2000. - 395 с.

45 Ungermann D., Lübke S., Brune B. Tests and design approach for plain channels in local and coupled local-flexural buckling based on Eurocode 3 // Thin-Walled Structures. 2014. Vol. 81. Pp. 108–120.

46 Moen C.D., Schafer B.W. Experiments on cold-formed steel columns with holes // Thin-Walled Structures. 2008. No.46. Pp. 1164–1182.

47 Tarigopula V., Langseth M., Hopperstad O.S., Clausen A.H. Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections // International Journal of Impact Engineering. 2006. No.32. Pp. 847–882.

48 Vatin N.I., Nazmeeva T., Guslinsky R. Problems of cold-bent notched c-shaped profile members // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 941–944. Pp. 1871–1875.

49 EN 1993–1–3:2009 EuroCode 3. Design of Steel Structures. Suplementary rules for cold-formed members and sheeting.– CEN.– 2009.– 125 p.

50 M. Mohammadreza and Sanjay R. A. Improving buckling response of the square steel tube by using steel foam, 2014.

51 Damodar Goud Tankara. Study of energy absorption characteristics of a thin walled tube filled with carbon nano polyurethane foam, 2011.

52 Steeve Chung Kim Yuen, Gerald N. Nurick, Sylvester Piu and Gadija Ebrahim. Response of filled thin-walled square tubes to axial impact load, 2014.

53 David Camenish Gelder. Buckling and Crippling of Square Steel ThinWalled Tubes Fabricated with Symmetrically Overlapping U-Channels and Foam, 2012.

54 Тарасов, А. В. Рамная конструкция с несущими элементами составного бикоробчатого сечения из тонколистовой оцинкованной стали / Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. науч. тр. – Одесса, 2012. – С. 256–251.

55 Тарасов, А.В. Экспериментально-теоретические исследования рамных конструкций из стальных тонкостенных холодногнутых профилей / дис. канд. тех. наук. – Красноярск, 2013. – 200 с.

56 Кретинин, А. Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей: составных поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Кретинин. – Новосибирск, 2008.–24 с.

57 Енджиевский, Л. В. Численные и экспериментальные исследования рамы каркаса здания из тонколистовой оцинкованной стали [Текст] / Л. В. Енджиевский, А. В. Тарасов // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – №10. – С. 52–54.

58 Зебельян, З. Методы расчет несущих элементов из тонкостенных гнутых профилей [Текст] / З. Зебельян // Изв. вузов. Стройметалл. – 2009. – №5. – С.14–18.

59 Полтораднев А. С. Несущая способность и оптимизация стальных тонкостенных балок. [Текст]: дис. ... канд. техн. Наук / Полтораднев А. С. – Москва, 2013. – 216 с.

60 Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский–Кригер; пер. с англ. В. И. Контовт; под. ред. Г. С. Шапиро. –М.: Наука, 1966. – 636 с.

61 Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов конструкций / С.П. Тимошенко; Избранные работы под ред. Э.И. Григолюка .- М.: Наука, 1975.- 704 с.

62 Тимошенко, С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гере.– М.: Наука, 1971.– 806 с.

63 Wei-Yang Lu. Mechanical Characterization of Rigid Polyurethane Foams. Sandia National Laboratories – 2014.

64 Michael K. Neilsen, Wei-Yang Lu, William M. Scherzinger, Terry D. Hinnerichs, Chi S. Lo. Unified Creep Plasticity Damage (UCPD) Model for Rigid Polyurethane Foams. Sandia National Laboratories – 2015.

65 СП 16.13330.2017. Стальные конструкции (Актуализированная редакция СНиП II-23-81*) [Текст] – М., 2017.

66 ГОСТ 27772–88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия [Текст]. – М.: Стандартиформ.

67 Металлические конструкции [Текст] / под ред. Н. П. Мельникова.– 2–е изд., перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1980.

68 Блейх, Ф. Устойчивость металлических конструкций / Ф. Блейх; пер. с англ. Ж. С. Сисляна, под. ред. Э.И. Григолюка. – М., 1959. С. – 395–465.

69 Субботин А.В. Исследование балок из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения, заполненных пеноматериалом - Красноярск, 2018.- 55 с.

*ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет
Инженерно-строительный институт
Кафедра "Строительные конструкции и управляемые системы"*

*Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных
тонкостенных несущих элементов с применением пенозаполнителя*

Выпускник: Самадов Н.С.

Руководитель: доцент, к.т.н. Тарасов А.В.

Красноярск 2021

Целью магистерской работы является:

- определение несущей способности балок из стальных холодногнутых оцинкованных профилей замкнутого сечения заполненных вспененным материалом.

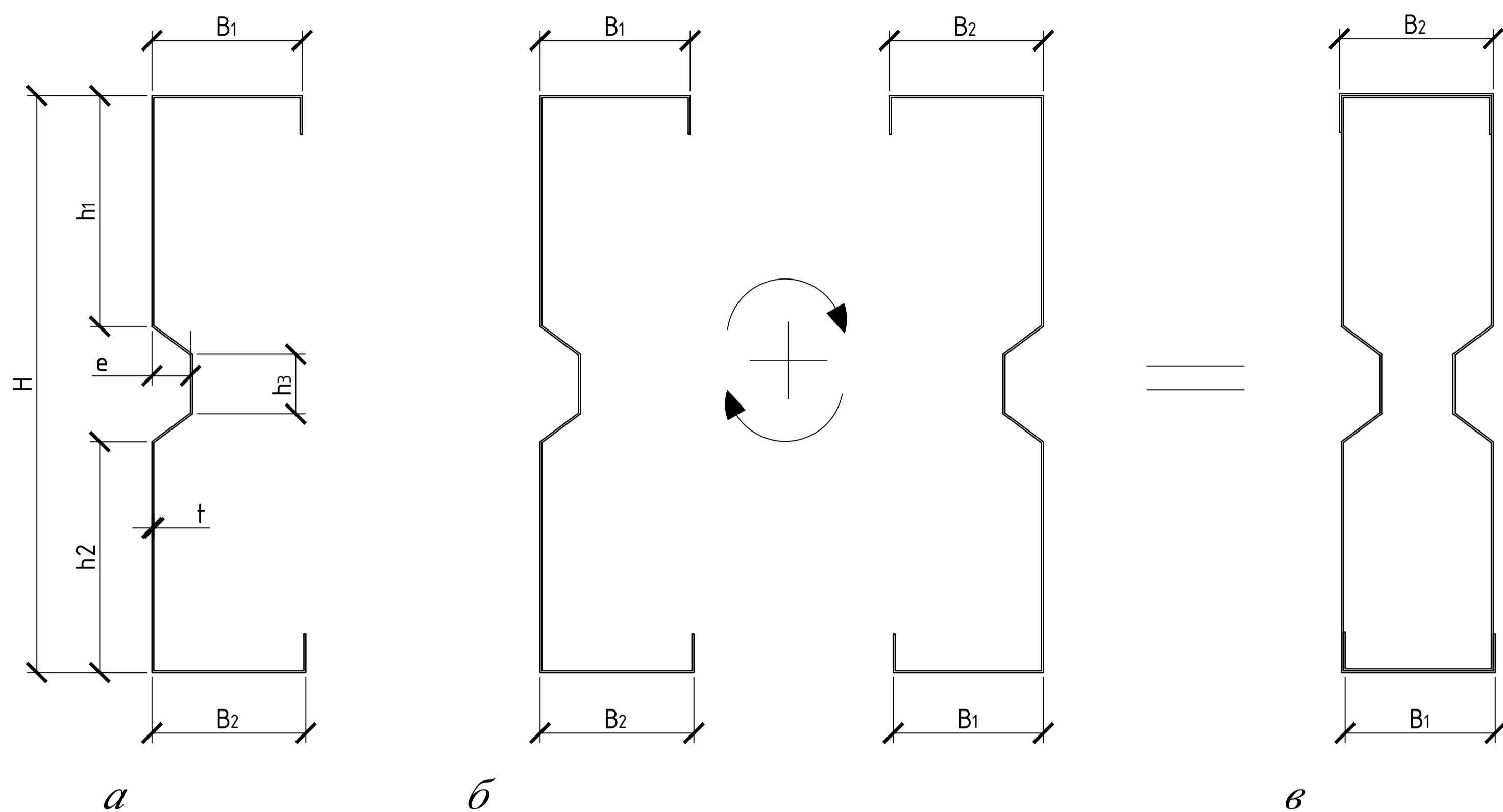
Задачи исследования:

- 1) Провести анализ материала для создания комбинированного элемента из стального тонкостенного профиля замкнутого сечения с заполнением внутренней полости;*
- 2) Определить адгезию пены к металлу;*
- 3) Выполнить численное исследование балок из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения как пустотелых, так и с заполнением внутренней полости вспененным материалом;*
- 4) Произвести анализ численных результатов для дальнейшего испытания конструкции из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения как пустотелых, так и с заполнением внутренней полости вспененным материалом и оценить эффективность принятого конструктивного решения.*

										МД-08.04.01.03-2021			
										ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет" Инженерно-строительный институт			
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата					Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных тонкостенных несущих элементов с применением пенозаполнителя	Страниц	Лист	Листов
Разработал		Санадов Н.С.										2	
Руководитель		Тарасов А.В.											
Зав. кафедрой		Дворников С.В.								Цель магистерской работы, задачи исследования	Кафедра СККУС		

Конструктивное решение скombинированных элементов

Образование коробчатого сечения несущих элементов



Для образования несущих элементов с замкнутым сечением принято решение использовать разнополочные Σ -профиля толщиной 1,0 мм. Данные профили имеют различную ширину полки $B1$ и $B2$ с учетом что:

$$B1 = B2 - 2 \cdot t,$$

где $B1$ - ширина меньшей полки;

$B2$ - ширина большей полки;

t - толщина металла профиля.

Для образования замкнутого коробчатого сечения два Σ -профиля расположены внутренней поверхностью друг к другу, и развернуты так, чтобы большая полка $B2$ одного профиля при сопряжении располагалась над меньшей полкой $B1$ другого профиля.

а) - форма сечения -профилей;

б) - развернутые профили для образования коробчатого сечения;

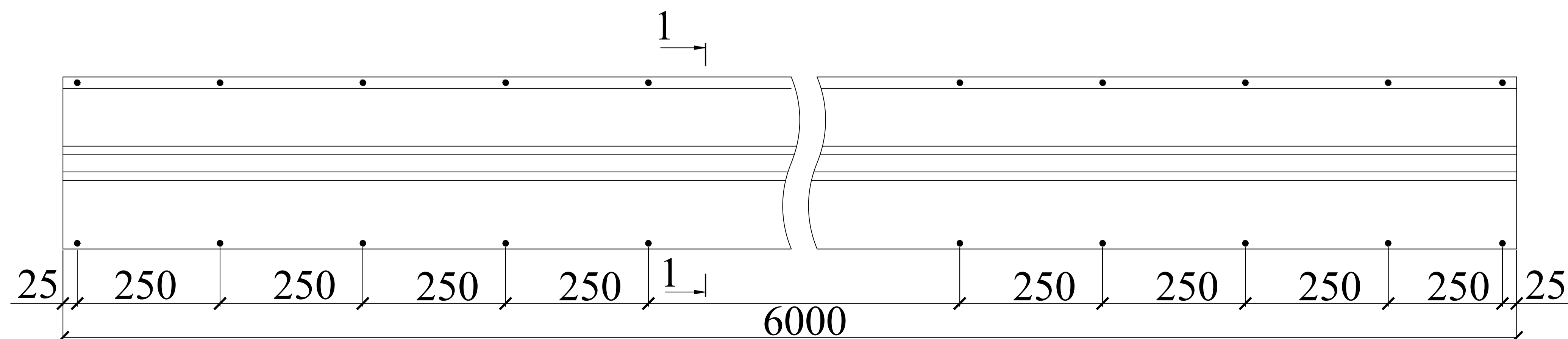
в) - коробчатое сечение несущих элементов

В данной работе для изготовления несущих элементов, балок используются

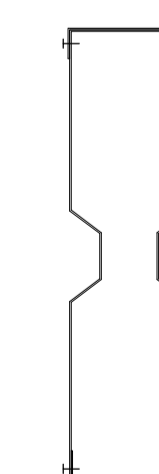
Σ -профиля со следующими параметрами:

$B1 = 78$ мм; $B2 = 80$ мм; $H = 300$ мм; $h1 = h2 = 120$, $h3 = 20$ мм; $t = 1$ мм;

Балка составного сечения



1-1



						МД-08.04.01.03-2021			
						ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет" Инженерно-строительный институт			
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных тонкостенных несущих элементов с применением пенозаполнителя	Стация	Лист	Листов
Разработал	Санадов Н.С.							3	
Руководитель	Тарасов А.В.								
Зав. кафедрой	Двордиев С.В.					Конструктивное решение скombинированных элементов	Кафедра СКУС		

Материал для заполнения внутренней полости балки замкнутого сечения

Технические показатели пеноизола и пенополиуретана

Характеристики	Пеноизол	Пенополиуретан	Характеристики
1	2	3	1
Плотность, кг/м ³	10-25	12-300	Плотность, кг/м ³
Предел прочности, Мпа:			Предел прочности, Мпа:
На сжатие	0,005-0,35	0,1-0,7	На сжатие
На изгиб	0,01-0,25	0,15-1,0	На изгиб
На растяжение	0,05-0,08	0,1-0,6	На растяжение
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	0,1-0,14	0,02 - 0,05	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)
Влагопоглощение, %	18-20	1-2,1	Влагопоглощение, %
Горючесть	Г2	Г3	Горючесть
Диапазон эксплуатационных температур, °С	От -50 до +80	От -100 до +100	Диапазон эксплуатационных температур, °С
Срок эксплуатации, лет	30	50	Срок эксплуатации, лет
Усадка, %	до 5	-	Усадка, %

Пеноизол – это жидкий карбамидно-формальдегидный пенопласт

Достоинства пеноизола:

- экологичность;
- достаточно низкая температура отвердевания;
- не горит и не выделяет токсичных газов при плавлении;
- хорошо принимает форму пустот и не расширяется при отвердевании.

Недостатки пеноизола:

- при усадке могут появляться трещины;
- требует надёжной защиты от влаги.

Пенополиуретан – полимерный материал, являющийся разновидностью пластмассы. Он получается в ходе реакции двух, а иногда и более компонентов.

Достоинства:

- высокая адгезия к разным материалам (металл, древесина, стекло, камень);
- высокие прочностные характеристики;
- высокая шумо- и теплоизоляция;
- экологичность (не содержит токсичные соединения);
- долговечность (срок службы 50 лет);
- устойчивость к перепадам температуры (актуально в климатических условиях России);
- не поддерживает горения.

Недостатки:

- относительно высокая стоимость;
- не устойчив к ультрафиолетовому излучению.

Характеристика пенополиуретана марки ТУТАН

№	Основа	Полиуретановый полимер
1	Скорость отвердевания	6 минут
2	Структура пены	76 % закрытых ячеек
3	Плотность	Около 42 кг/м ³
4	Термостойкость	От -40 до +100 °С
5	Огнестойкость	B2
6	Водопоглощение	0,23 кг/м ²
7	Прочность при сдвиге	119 кПа
8	Прочность при растяжении	212 кПа
9	Прочность при сжатии	95 кПа
10	Удлинение при разрыве	25,5 %
11	Изменение линейных размеров	<5%



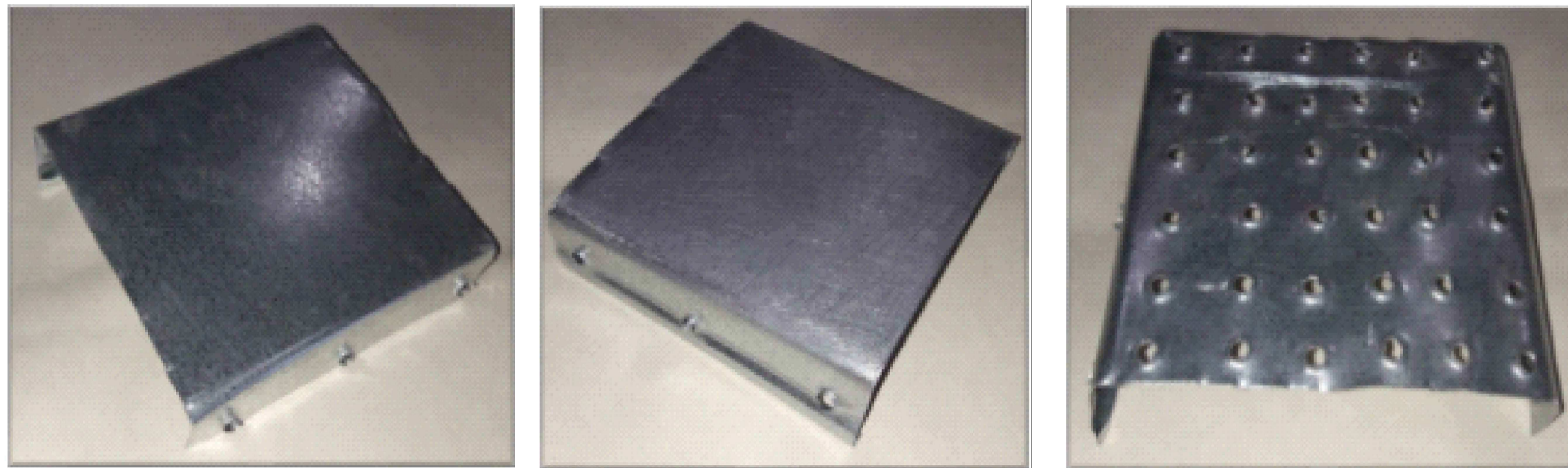
Свойства:

- Быстрое затвердение, независимо от уровня влажности в воздухе;
- Высокая стабильность (никакой усадки или последующей экспансии);
- Высокая сцепляемость к строительным поверхностям;
- Наполнение безопасное для окружающей среды.

МД-08.04.01.03-2021					
ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет"					
Инженерно-строительный институт					
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Разработал	Санадов Н.С.				
Руководитель	Тарасов А.В.				
Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных тонкостенных несущих элементов с применением пенозаполнителя				Стандия	Лист
					4
Материал для заполнения внутренней полости балки замкнутого сечения				Кафедра СКУС	
Зав. кафедрой	Дворниев С.В.				

Экспериментальное исследование адгезии пенополиуретана к металлу

Результаты испытаний



1

2

3

Стальные листы изготовлены трёх видов:

1) лист, обработанный обезжиривателем (ТУ 0251-009-57859009-2015)

2) лист, обработанный обезжиривателем и шлифовальным листом P220, P80, P40

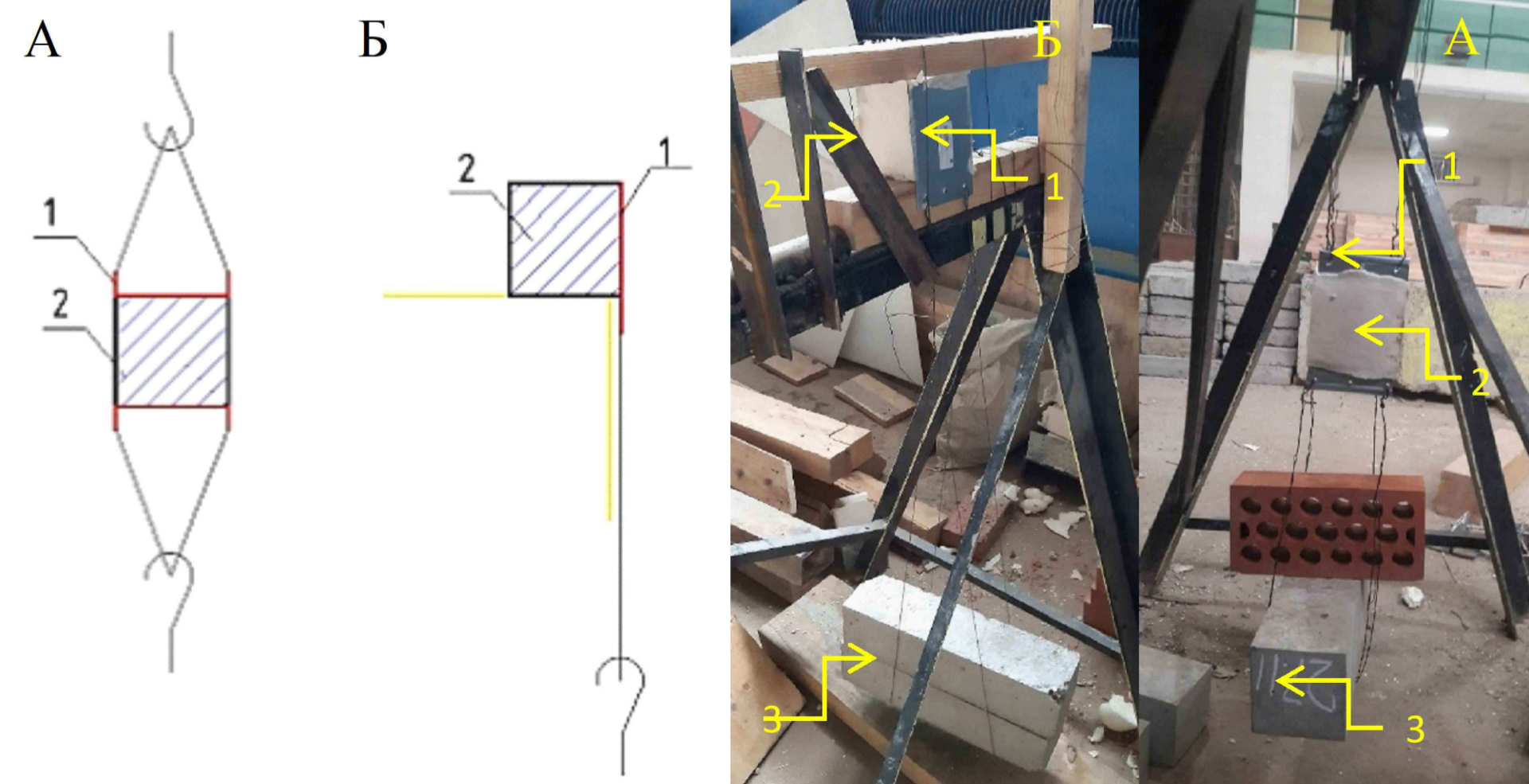
3) лист, обработанный обезжиривателем с отверстиями от просекателя

(Просекатель Matrix 87951). Отверстия сделаны с шагом 1,5 см, диаметр отверстия 3 мм

Кубы 10x10x10 см из пенополиуретана,
прикрепленного к стальному листу



Расчетная схема установки



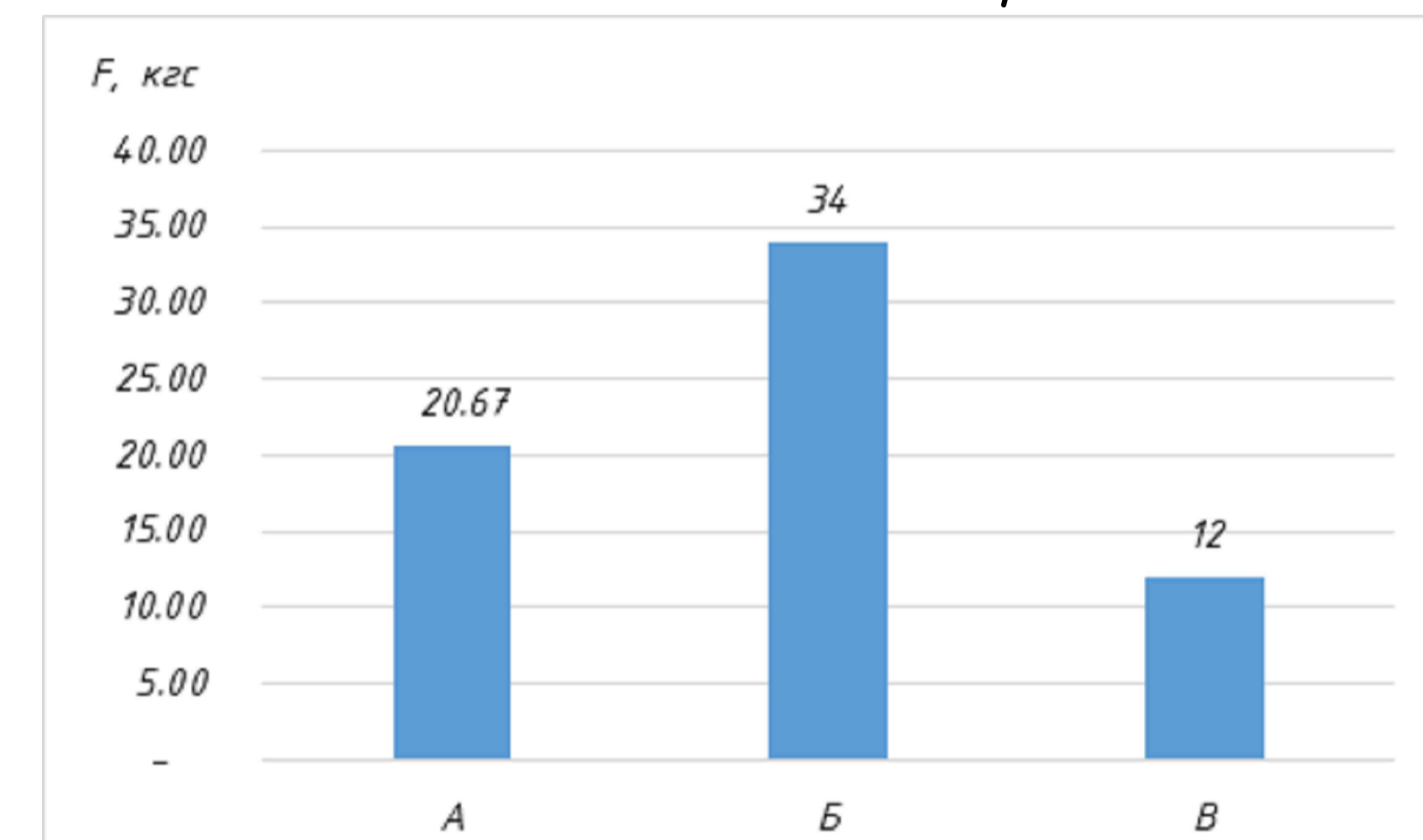
- 1) Стальной лист толщиной 1 мм;
- 2) Пенополиуретан;
- 3) Весовая нагрузка



Результаты испытаний на отрыв

Поверхность металла обработана обезжиривателем			
Поз.	Тип образца	Нагрузка, кгс	Напряжение, кгс/см ²
1	1А	21	0,21
2	2А	23	0,23
3	3А	18	0,18
Поверхность металла обработана обезжиривателем и шлифовальным листом			
4	1Б	34	0,34
5	2Б	39	0,39
6	3Б	29	0,29
Поверхность металла обработана обезжиривателем и сделаны отверстия с помощью просекателя			
7	1В	16	0,16
8	2В	23	0,23
9	3В	18	0,18

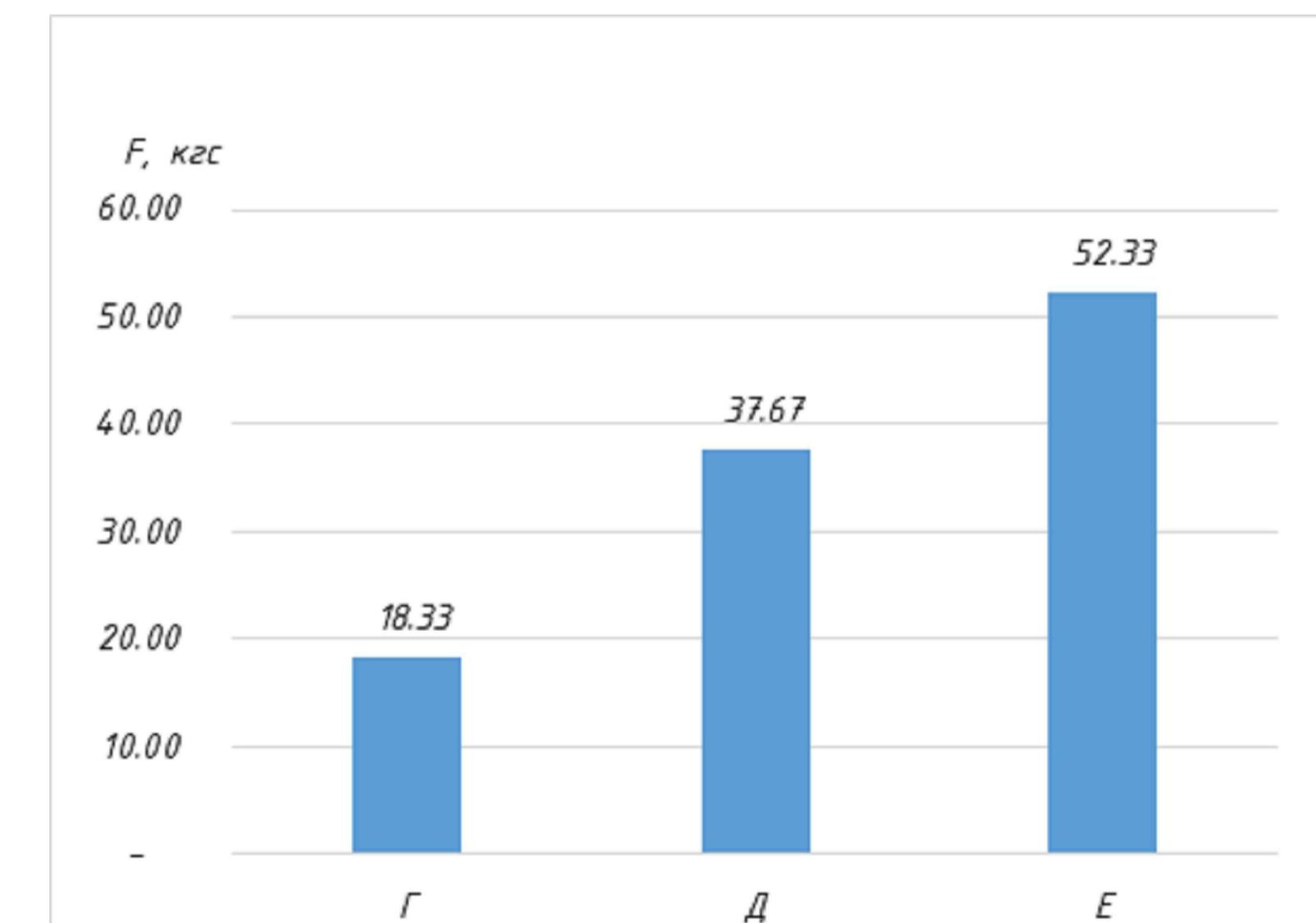
Гистограмма численных результатов испытаний на отрыв



Результаты испытаний на срез

Поверхность металла обработана обезжиривателем			
Поз.	Тип образца	Нагрузка, кгс	Напряжение, кгс/см ²
1	1Г	16	0,16
2	2Г	21	0,21
3	3Г	18	0,18
Поверхность металла обработана обезжиривателем и шлифовальным листом			
4	1Д	32	0,32
5	2Д	39	0,39
6	3Д	42	0,42
Поверхность металла обработана обезжиривателем и сделаны отверстия с помощью просекателя			
7	1Е	65	0,65
8	2Е	46	0,46
9	3Е	46	0,46

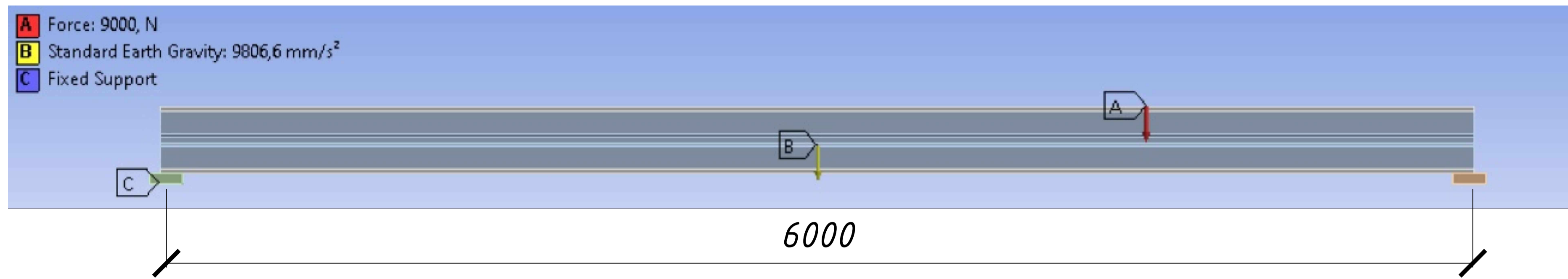
Гистограмма численных результатов испытания на срез



МД-08.04.01.03-2021					
ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет" Инженерно-строительный институт					
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Разработал	Санадов Н.С.				
Руководитель	Тарасов А.В.				
Зав. кафедрой	Дворников С.В.				
Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных тонкостенных несущих элементов с применением пенополиуретана				Стация	Лист
Экспериментальное исследование адгезии пенополиуретана к металлу				5	Листов
				Кафедра СКУС	

Численное исследование балок из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения

Численная модель балки



Для обеспечения местной устойчивости участков профиля, работающих в упругой области, при действии нормальных напряжений по краям в общем виде должно выполняться условие:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{cr},$$

Критическое напряжение, соответствующее потере устойчивости пластинки шириной h и толщиной t определяется по формуле согласно СП 260.1325800.2016

$$\sigma_{cr} = \frac{k_{\sigma}(\pi^2 * E)}{12 * (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2$$

При расчете стенки сжато-изогнутой балки на устойчивость должно выполняться условие:

$$\sigma_{\max} \leq \chi_{\tau} \cdot \sigma_{cr},$$

где χ_{τ} – коэффициент, учитывающий наличие касательных напряжений по краям расчетной пластинки.

Таким образом критическое напряжение равно:

$$\sigma_{cr} = \frac{4 \cdot (3,14^2 \cdot 2,06 \cdot 10^5)}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \left(\frac{1}{120}\right)^2 = 51,6 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\max} \leq \chi_{\tau} \cdot \sigma_{cr},$$

$$\sigma_{\max} \leq 0,9 \cdot 51,6 = 46,4 \text{ МПа}.$$

Свойства материалов численной модели

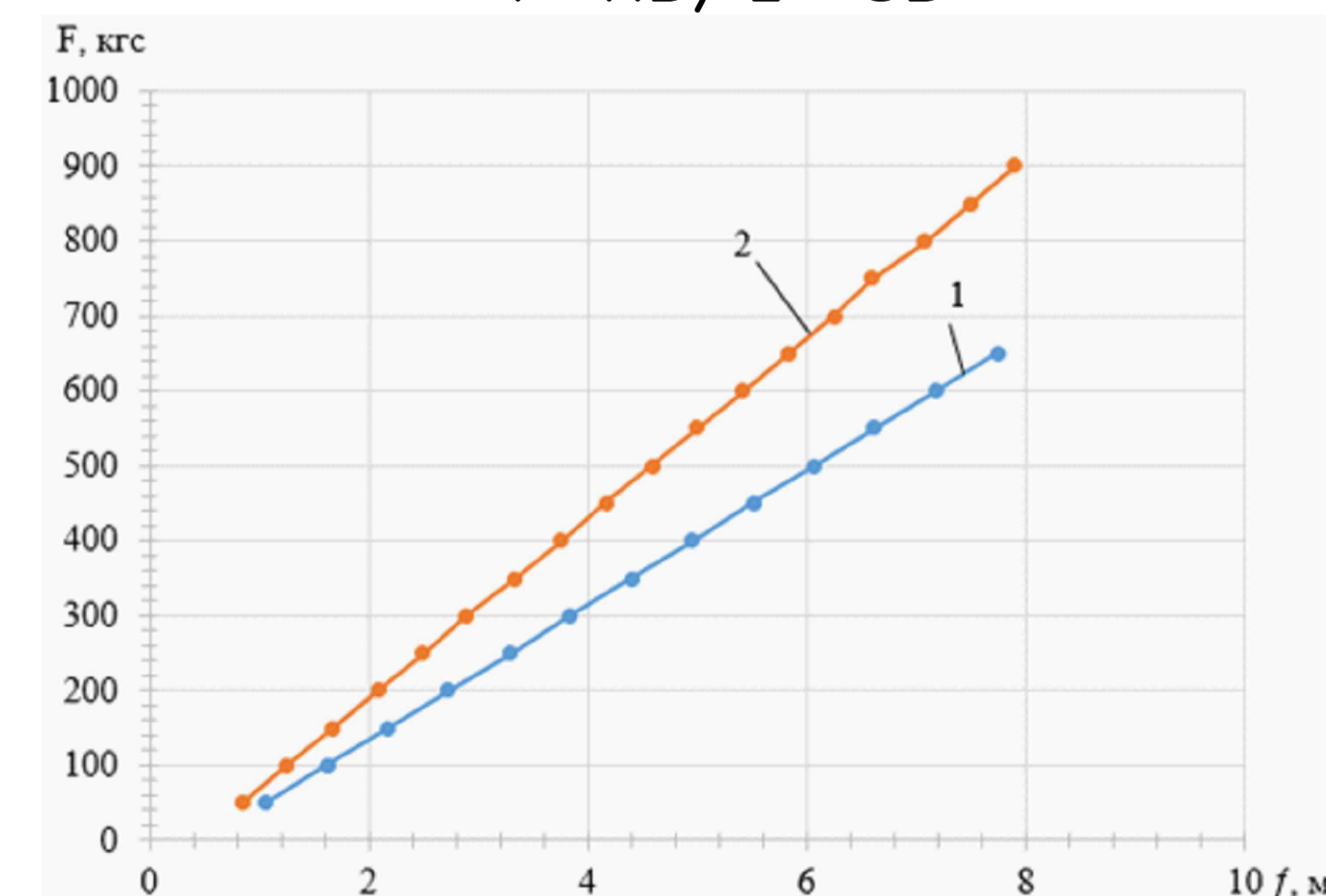
Материал	Плотность, кг/м³	Предел текучести, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Сталь	7850	240	$2,06 \cdot 10^5$	0,3
Пенополиуретан	42	12	61	0,25

Результаты расчета численной модели

Поз.	Тип образца	Нагрузка, кгс	Прогиб, мм	Напряжение, МПа	Несущая способность, кгс
1	БП	50	1,06	6,65	650
		100	1,62	9,6	
		150	2,18	12,32	
		200	2,73	15,43	
		250	3,29	18,57	
		300	3,84	21,71	
		350	4,4	24,86	
		400	4,96	27,94	
		450	5,51	31,12	
		500	6,07	35,26	
		550	6,62	38,36	
		600	7,18	43,54	
		650	7,74	47,9	
		700	7,99	51,1	
		750	8,41	53,41	
		800	8,96	56,91	
		850	9,62	59,87	
900	10,53	65,14			
2	БЗ	50	0,85	6,2	900
		100	1,26	9,22	
		150	1,68	12,25	
		200	2,09	15,28	
		250	2,5	18,3	
		300	2,9	21,33	
		350	3,34	24,36	
		400	3,76	27,38	
		450	4,17	30,41	
		500	4,59	33,43	
		550	5	36,46	
		600	5,42	39,49	
		650	5,84	42,51	
		700	6,25	45,54	
		750	6,6	48,57	
		800	7,08	51,59	
		850	7,5	54,62	
900	7,9	57,64			
Увеличение несущей способности					27,7%

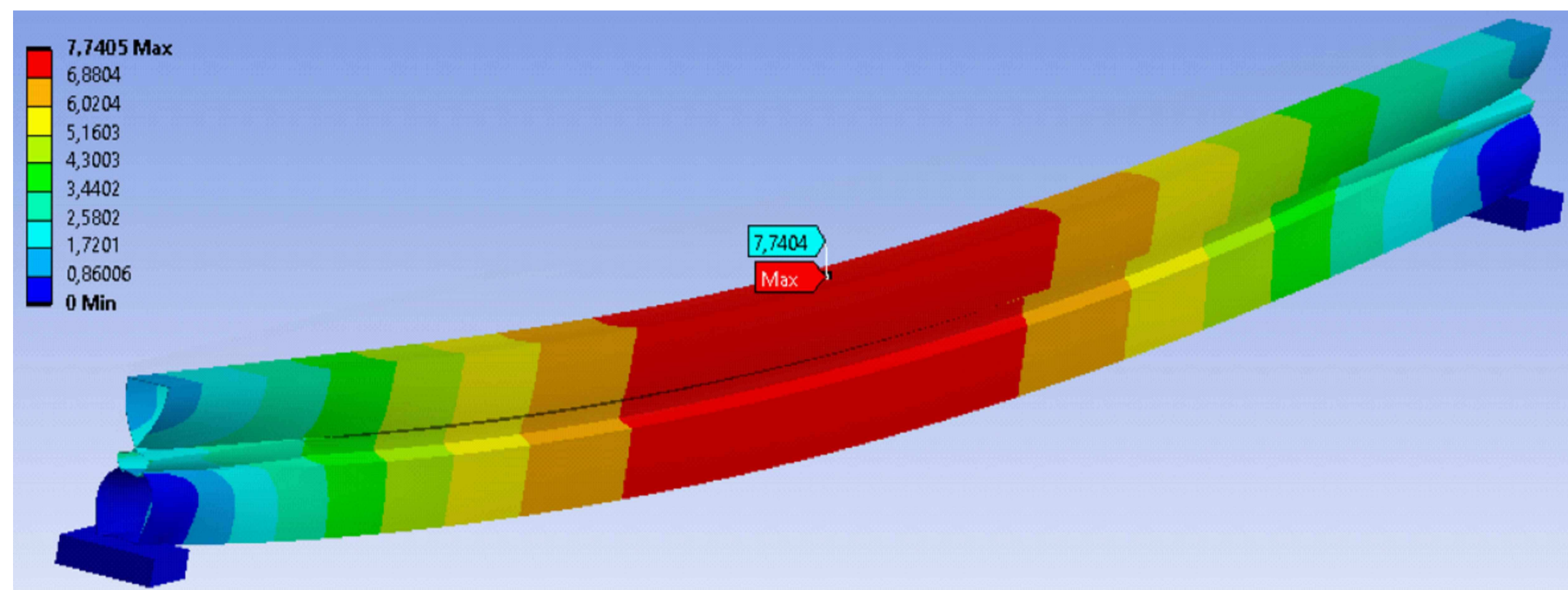
Диаграмма результатов численного расчета:

1- ПБ; 2- ЗБ

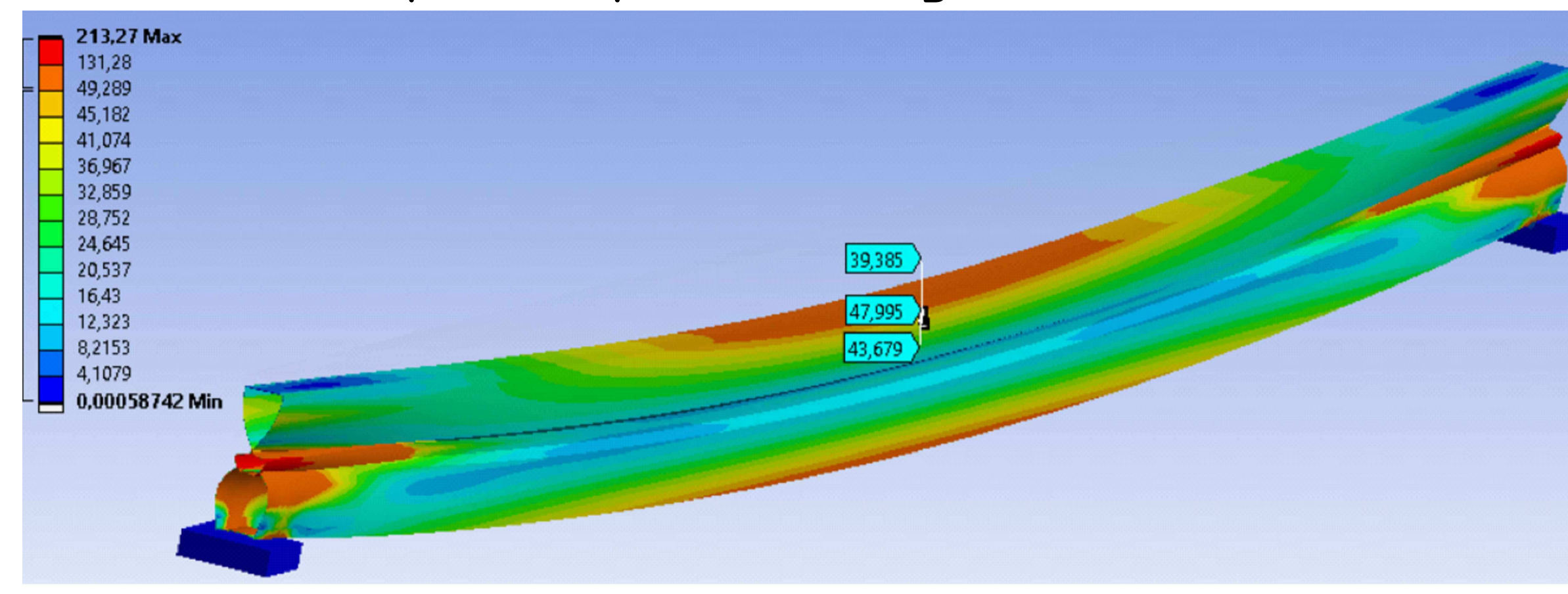


МД-08.04.01.03-2021					
ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет"					
Инженерно-строительный институт					
Изм.	Кол. уч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Разработал	Санадов Н.С.				
Руководитель	Тарасов А.В.				
Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных тонкостенных несущих элементов с применением пенополиуретана				Стация	Лист
					6
Численное исследование балок из стальных тонкостенных профилей замкнутого сечения				Кафедра СКУС	
Зав. кафедрой	Дворников С.В.				

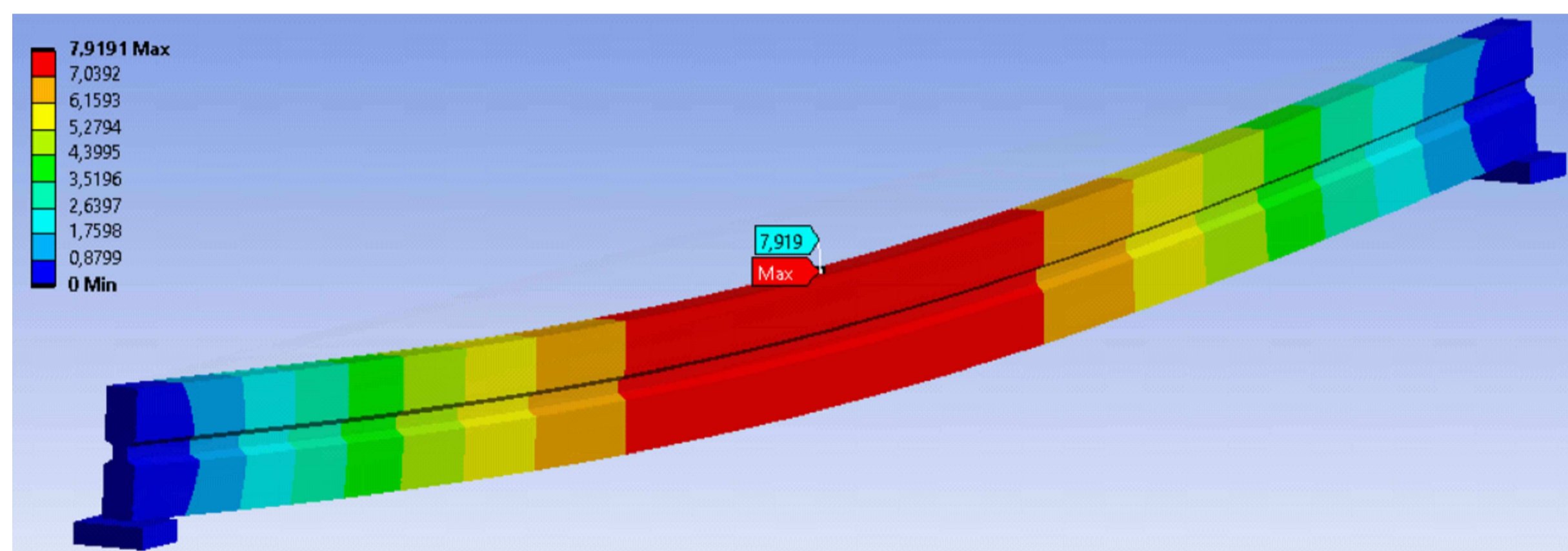
Эюра деформации пустотелой балки



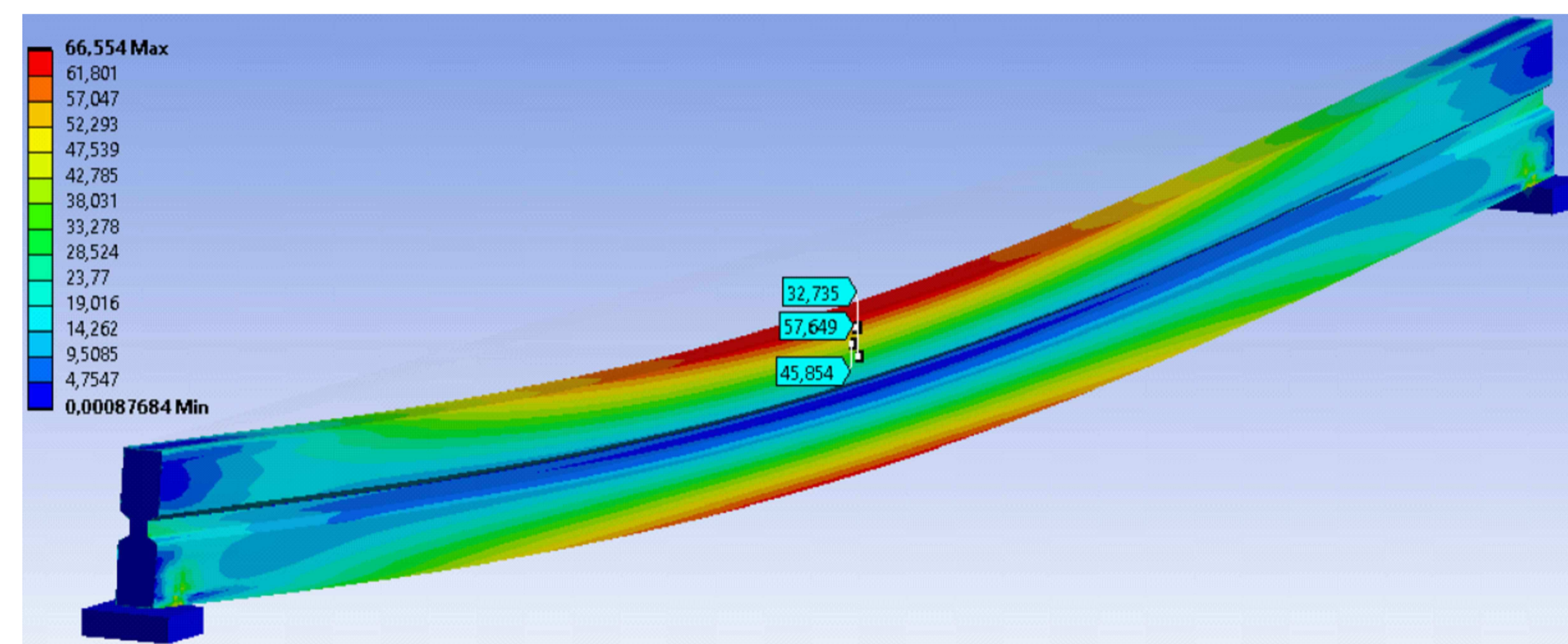
Эюра напряжений пустотелой балки



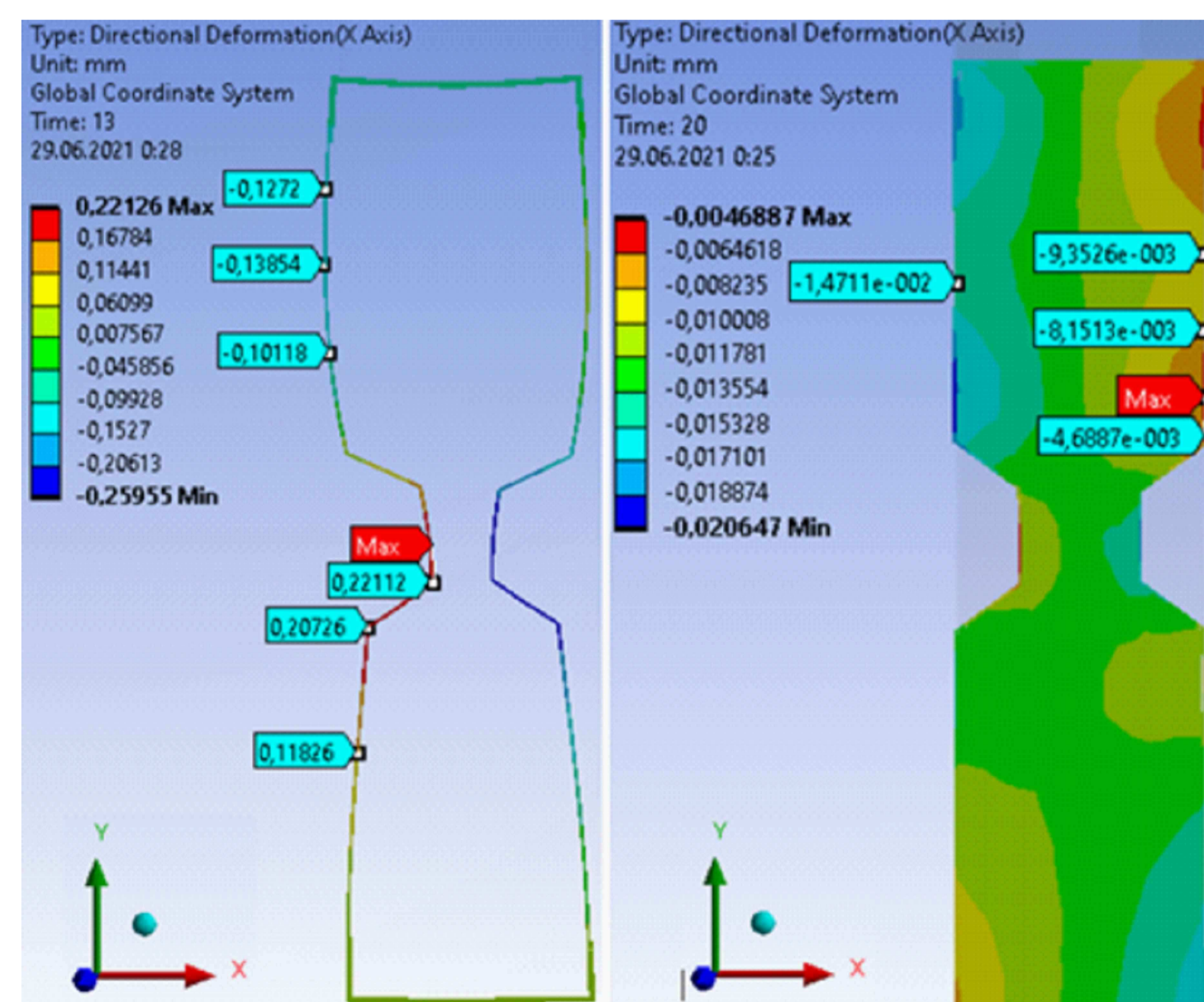
Эюра деформации заполненной балки



Эюра напряжений заполненной балки



Эюра деформации пустотелой балки и заполненной балки по оси x



Выводы:

- В ходе исследований, выполненных в данной работе установлены зависимости, подтверждающие эффективность применения вспененных материалов в области ЛСТК, которые требуют дальнейших исследований.
- В результате натурных испытаний наиболее эффективным для наилучшей адгезии при испытании на отрыв стал образец, обработанный шлифовальным листом, показатели которого составили 34 кгс. По данным, полученным при испытании на срез, наилучший результат показал образец с отверстиями и составил 52,33 кгс. Так как образец с отверстиями имеет меньшую площадь адгезии, для дальнейшего испытания балки из ЛСТК замкнутого сечения принимаем поверхность, обработанную шлифовальным листом.
- В результате анализа полученных предельных нагрузок на основании численного расчета показывает, что заполнение внутренней полости замкнутого сечения балок пенополиуретаном плотностью 42 кг/м³ приводит к увеличению местной устойчивости стенок балки и, следовательно, к увеличению несущей способности на 27,7%. Заполнение балки пенополиуретаном способствует равномерному перераспределению напряжения, в то время как пустотелая балка имеет неравномерное распределение напряжения. Кроме того, известные теоретические и экспериментальные предпосылки свидетельствуют о повышении несущей способности аналогичных балок за счет повышения устойчивости стенок, однако данные положения почти не поддаются надежному численному исследованию без экспериментальных данных. Поэтому, дальнейшие исследования и верификацию полученных результатов планируется осуществить натурными испытаниями конструкций.

					МД-08.04.01.03-2021				
					ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет" Инженерно-строительный институт				
Изм.	Кол.уч.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных тонкостенных несущих элементов с применением пенозаполнителя	Стандия	Лист	Листов
Разработал	Санадов Н.С.							7	
Руководитель	Тарасов А.В.								
Зав. кафедрой	Дворниев С.В.					Эюра напряжений, эюра деформации, вывод	Кафедра СКУС		

РЕЦЕНЗИЯ

на выпускную квалификационную работу студента
СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Инженерно-строительного института

направления подготовки 08.04.01 «Строительство», профиль
08.04.01.03 «Теория и проектирование зданий и сооружений»

Самадова Наби Самадовича

на тему: Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных тонкостенных несущих элементов с применением пенозаполнителя

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников. Диссертация содержит 53 страницы, 23 рисунков, 7 таблиц, список использованных источников из 69 наименований.

Магистерская диссертация содержит три основных разделов:

- 1 Состояние вопроса и задачи исследования;
- 2 Экспериментальное исследование адгезии пенополиуретана к металлу;
- 3 Численное исследование балок из стальных тонкостенных

Σ - профилей замкнутого сечения;

В магистерской диссертации Самадова Н.С. чётко сформулированы цель и поставленные задачи, для ее достижения.

В первой главе проводится обзор литературы и прочей информации по исследованию заполнения вспененными материалами стальных и алюминиевых конструкций, анализ различных материалов таких как: ЛСТК и пенозаполнителей и представлены конструктивные решения образования замкнутого сечения разнополочных Σ -профилей.

Во второй главе приведены данные об испытании по определению адгезии пенополиуретана к металлу.

В третьей главе представлены результаты экспериментально-теоретических исследований балок из тонкостенных Σ - профилей составного сечения с заполнением внутренней полости пенополиуретаном на основе конечно-элементного моделирования.

В диссертационном исследовании автором представлены:

- практические данные подбора материала исследования;
- расчетные значения предела нагрузок металла;
- результаты численного эксперимента совместной работы пенополиуретана и ЛСТК;

– модельные исследования совместной работы пенополиуретана и ЛСТК в программном комплексе ANSYS;

Магистерская диссертация Самадова Н.С. имеет логически правильную структуру. Она состоит из введения, трех разделов, заключения, а также списка использованной при написании магистерской работы литературы и приложений.

Содержание и структура пояснительной записки раскрывает тему магистерской диссертации.

Анализ представленной работы говорит о том, что Самадова Н.С. хорошо владеет нормативными и методическими материалами, умеет анализировать статистические данные и применяет полученные данные в практических целях.

Работа написана грамотным языком с использованием фактических данных, специальной литературы, правильно оформлена, имеются в наличии предложения для практического применения.

Наряду с положительными аспектами, изложенными в диссертации, следует отметить и некоторые недостатки:

- не в полном объеме рассмотрены имеющиеся данные литературного исследования;

- не в полном объеме представлен практический эксперимент исследования.

Литературное оформление магистерской диссертации соответствует СТО 4.2-07-2014.

В процессе написания магистерской диссертации автор доказал, что может самостоятельно решать поставленные задачи.

В целом, несмотря на указанные недостатки, магистерская диссертация удовлетворяет требованиям направления 08.04.01 и заслуживает оценки «отлично», а Самадов Н.С. достоин присвоения квалификации магистр по направлению «Строительство».

Рецензент:

Главный инженер проекта

ООО «Енисей-строй»

« 24 » 06 2021 г.

Подпись рецензента заверяю:

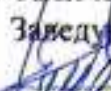


А. Г. Гавриленко

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-строительный институт
институт
Строительные конструкции и управляемые системы
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 С.В. Деордиев

подпись, инициалы, фамилия

«29» 06 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Экспериментально-теоретические исследования комбинированных стальных
тонкостенных несущих элементов с применением пенозаполнителя

тема

08.04.01 Строительство

код и наименование направления

08.04.01.03 Теория и проектирование зданий и сооружений


код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

 28.06.21
подпись, дата, должность, ученая степень


Тарасов А.В.
инициалы, фамилия

Выпускник

 26.06.21
подпись, дата

Самадов Н.С.
инициалы, фамилия

Рецензент

 26.06.21
подпись, дата, должность, ученая степень

Гавриленко А.Г.
инициалы, фамилия

Красноярск 2021