Ильдияров, Евгений Викторович. Экспериментально-теоретическая оценка надежности трехслойных кровельных панелей с ортотропным средним слоем из минеральной ваты на основе базальтового волокна : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.01 / Ильдияров Евгений Викторович; [Место защиты: Науч.-исслед. центр "Стр-во"].- Самара, 2012.- 183 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-5/2773

**Министерство образования и науки РФ ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно- строительный университет»**

**На поавах рукописи**

**ИЛЬДИЯРОВ Евгений Викторович**

**Экспериментально-теоретическая оценка надежности трехслойных кровельных панелей с ортотропным средним слоем из минеральной ваты на основе базальтового волокна**

Специальность 05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор И.С. Холопов

Самара 2012

СОДЕРЖАНИЕ Стр

[ВВЕДЕНИЕ 6](#bookmark1)

1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА 14
   1. Исторический обзор применения трехслойных панелей

в строительстве 14

* 1. Материалы, применяемые при изготовлении

трехслойных панелей.. 23

* 1. Особенности технологий, применяемых при изготовлении

трехслойных панелей 27

* 1. [Исследования в области расчета трехслойных панелей 31](#bookmark8)
  2. [Цель и задачи исследования 38](#bookmark10)

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО­

МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ СО СРЕДНИМ СЛОЕМ ИЗ МИНЕРАЛОВАТНОЙ ПЛИТЫ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА 40

* 1. Определение основных характеристик материалов стальных обшивок 41
  2. Определение физико-механических характеристик минераловатного

среднего слоя при сжатии, растяжении и сдвиге 46

* 1. Определение физико-механических характеристик минераловатного

среднего слоя при изгибе 57

* 1. Испытание фрагмента панели для определения основных

характеристик материалов при их работе в составе панели на растяжение и сдвиг 59

* 1. Выводы по результатам испытания обшивок, минераловатного

среднего слоя и фрагмента панели 66

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТРЕХСЛОЙНЫХ КРОВЕЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ИЗГИБЕ 67
   1. Конструкция панели. Разработка экспериментальной установки и

нагрузочного устройства 67

з

* 1. Планирование эксперимента 74
  2. Выполнение предварительных расчетов кровельных панелей на изгиб с

применением МКЭ 76

* + 1. [Результаты предварительного расчета панелей по однопролетной схеме 80](#bookmark25)
    2. Результаты предварительного расчета панелей по двухпролетной схеме 90
  1. Экспериментальное исследование панелей при работе на изгиб по

однопролетной схеме 99

* 1. Экспериментальное исследование панелей при работе на изгиб по

двухпролетной схеме 107

* 1. Экспериментальное испытание крепления панели при моделировании

отрыва обшивки вследствие действия пиковой ветровой нагрузки 126

* 1. [Выводы по результатам экспериментальных исследований 132](#bookmark31)

1. РАСЧЕТ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С ОРТОТРОПНЫМ

СРЕДНИМ СЛОЕМ 133

* 1. Постановка задачи и описание расчетных моделей панелей с учетом

ортотропности среднего слоя для расчета на изгиб 134

* 1. Расчет с использованием ВК ANSYS и анализ напряженно-

деформированного состояния панелей при изгибе по однопролетной схеме 135

* 1. Расчет с использованием ВК ANSYS и анализ напряженно-

деформированного состояния панелей при изгибе по двухпролетной схеме 140

* 1. Расчет гофра на устойчивость по методу КЭ и аналитическими

методами 145

* 1. [Выводы и результаты по главе 149](#bookmark35)

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ В

ПРАКТИКЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ 150

* 1. Разработка элементов усиления гофрированной обшивки при действии

пиковых нагрузок 150

* 1. Определение долговечности эксплуатации трехслойных панелей по

условиям старения клеевого слоя 151

* 1. Разработка инженерной методики расчета кровельных панелей 153
  2. Практические рекомендации по определению несущей способности

трехслойных кровельных панелей 162

* 1. [Внедрение результатов исследования в практику проектирования 165](#bookmark47)
  2. [Выводы по главе 166](#bookmark48)

Основные выводы и результаты 167

Список литературы 169

Приложение А (акты и справки о внедрении) 178

ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы**

Трехслойные кровельные панели с минераловатным средним слоем нашли в настоящее время широкое применение в строительстве. Этому способствуют высокие теплотехнические и звукозащитные качества,

быстрый и простой монтаж, низкие затраты на капитальное строительство, дополнительное энергосбережение в процессе эксплуатации. Применение в качестве среднего слоя минераловатного утеплителя на основе базальтового волокна обеспечивает практическую несгораемость панели и экологическую безопасность при высоких температурах пожара, сохраняя в течение длительного времени необходимые требования по целостности и теплопроводности.

Несмотря на богатый опыт использования таких панелей за рубежом, их эксплуатация в российских условиях отличается рядом особенностей. Прежде всего это значительные снеговые нагрузки, действующие в течение длительного времени в зимний период и повторяющиеся многократно за время эксплуатации. Перепады сезонных температур (от -40 °С до +40 °С) и значительная разница между наружной и внутренней температурами помещений также влияют на несущую способность и деформативность панелей. При неправильном выборе расчетных параметров и определении свойств материалов эти факторы могут существенно ограничить срок их эксплуатации.

Необходимо также учитывать, что развитие производства трехслойных панелей привело к необходимости использовать утеплители из базальтовой ваты, клеи и оцинкованные стальные обшивки, произведенные в России. Свойства этих материалов могут отличаться от зарубежных аналогов, что влияет на напряженно- деформированное состояние (НДС) конструкций.

Для обеспечения безопасной эксплуатации кровельных панелей необходимо выполнить экспериментальные и теоретические исследования их поведения и напряженно-деформированного состояния в условиях действия нагрузок, соответствующих отечественным нормам и с учетом особенностей производства. Требуется также разработать достаточно простую, предназначенную для широкого использования, инженерную методику расчета и проектирования, учитывающую особенности их работы в реальных условиях эксплуатации. Такие исследования необходимы для обеспечения надежной эксплуатации трехслойных кровельных панелей и, по мнению автора, являются актуальными.

**Цель работы** заключается в экспериментальном и теоретическом исследовании напряженно-деформированного состояния трехслойных кровельных панелей с ортотропным средним слоем из базальтовой минеральной ваты с различными по профилю металлическими обшивками и последующей разработкой методики их расчета, позволяющей обеспечить надежную эксплуатацию конструкции.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач:**

1. Выполнить экспериментальные исследования физико-механических свойств металлических обшивок и среднего слоя из минераловатных плит на основе базальтового волокна.
2. Выполнить экспериментальные исследования фрагментов трехслойных панелей с ортотропным средним слоем из базальтовой минеральной ваты для определения механических и деформационных характеристик материалов при их работе в составе панели на растяжение и сдвиг.
3. Выполнить экспериментально-теоретические исследования для

определения закономерностей развития напряженно-деформированного состояния (НДС) трехслойных кровельных панелей при изгибе по однопролетной и многопролетной схеме.

1. Разработка расчетной модели и методики расчета трехслойных

кровельных панелей с ортотропным средним слоем различной толщины при

изгибе по однопролетной и многопролетной схеме с основе метода конечных элементов (МКЭ) с использованием ВК ANSYS. Анализ результатов расчетов по разработанной методике и сравнение с экспериментальными данными.

1. Выполнить теоретические исследования устойчивости гофра панели с

использованием МКЭ и аналитических решений.

1. Выполнить экспериментальные и теоретические

исследования крепления кровельных панелей самонарезающими винтами при действии отрывающих пиковых ветровых нагрузок.

1. Разработать инженерную методику расчета трехслойных кровельных панелей с сильно профилированной верхней обшивкой при изгибе по однопролетной и многопролетной схеме.
2. С использованием кинетической теории прочности разработать методику определения долговечности для трехслойных панелей с использованием полиуретановых клеев.
3. Разработать практические рекомендации по рациональному выбору кровельных панелей со средним слоем из базальтовой минеральной ваты при проектировании.

**Научная новизна**

1. В трехслойных панелях экспериментально определены физико­механические свойства материала металлических обшивок и среднего слоя из минераловатных плит на основе базальтового волокна. Установлены новые деформационные характеристики, указывающие, что средний слой является маложестким и обладает ярко выраженными ортотропными свойствами.
2. При исследовании фрагментов трехслойных панелей с ортотропным средним слоем из базальтовой минеральной ваты получены новые экспериментальные данные о механических и деформационных характеристиках материалов при их работе в составе панели на растяжение, сжатие и сдвиг. Определено время стабилизации деформаций в зависимости от уровня нагружения. Установлено, что критерием разрушения минеральной ваты, в отличие от пенопласта, является не предельная относительная деформация среднего слоя, а начало расслоения волокон ваты при обжатии.
3. На основе экспериментально-теоретических исследований выявлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния

(НДС) трехслойных кровельных панелей при изгибе по однопролетной и многопролетной схеме и определены границы линейной стадии работы. Установлено, что критерием исчерпания несущей способности панели при изгибе является развитие существенных сдвиговых деформаций, сопровождающихся обжатием и расслоением среднего слоя в опорной зоне и образование пластического шарнира в нижней обшивке.

1. Разработана расчетная модель и методика расчета трехслойных кровельных панелей с ортотропным средним слоем различной толщины при изгибе по однопролетной и многопролетной схеме с использованием ВК ANSYS. Расчеты по разработанной методике обеспечивают совпадение результатов с экспериментальными данными в пределах до 10%, что указывает на надежность предложенной методики при расчете и проектировании панелей с различными характеристиками компонентов.
2. Теоретические исследования на основании МКЭ и аналитических методик по анализу устойчивости гофра показали, что в кровельных панелях в гофрах верхней обшивки шириной до 30 мм и высотой до 40 мм при толщинах обшивки 0,6-0.7 мм при нагрузке, соответствующей линейной работе, потери устойчивости гофра не наступает. РТспытания панелей подтверждают этот факт.
3. Экспериментальные и теоретические исследования крепления кровельных панелей самонарезающими винтами при действии отрывающих пиковых ветровых нагрузок показали возможность разрушения гофров в зоне крепления винта. Предложен способ усиления крепления и методика его расчета.
4. Разработана инженерная методика расчета трехслойных кровельных панелей с сильно профилированной верхней обшивкой при изгибе. В отличие от норм Еврокода предложенная методика позволяет рассчитывать кровельные панели не только для однопролетной, но и для многопролетных схем. Результаты расчета по предлагаемой методике достаточно близко (до

10%) совпадают с экспериментальными данными и

с данными расчета по европейским нормам для однопролетных схем.

8 На основе кинетической теории прочности для трехслойных панелей с использованием полиуретановых клеев предложена методика определения долговечности панелей при флуктуации напряжений в обшивках и клее в условиях воздействия температур различного уровня.

**Методы исследования** При выполнении работы использовались следующие методы:

1. Экспериментальные исследования прочностных и деформационных характеристик материалов (утеплителя, обшивок) и конструкции панелей при различных схемах нагружения и опирания с использованием современной измерительной техники на базе ЭВМ.
2. Сравнение результатов экспериментов с результатами, полученными другими исследователями.
3. Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния с использованием современных вычислительных комплексов (ANSYS, LIRA) , основанных на методе конечных элементов.
4. Сравнение результатов теоретического анализа НДС панелей с данными выполненных экспериментов.
5. Использование аналитических решений и МКЭ для анализа устойчивости гофров.
6. Использование теории кинетической прочности при анализе долговечности панелей.

**Достоверность результатов**

Достоверность данных, полученных в экспериментальных исследованиях, обеспечена применением научно-обоснованных методик, использованием современной измерительной техники и сертифицированного оборудования, проведением обширного натурного эксперимента, статистической обработкой и сравнением с результатами, полученными другими авторами. Достоверность теоретических исследований обеспечивается использованием современных

вычислительных методов строительной механики и результатов аналитических решений, полученных различными авторами, сравнением с методикой Еврокода, а также совпадением до 10% с результатами экспериментальных исследований. **Практическая ценность и внедрение результатов исследований**

1. Выполненные экспериментальные исследования материалов трехслойных панелей позволили получить новую информацию об их прочностных и жесткостных характеристиках и установить ортотропность среднего слоя. Эти данные следует использовать при проектировании и расчете панелей.
2. Экспериментальные и теоретические исследования трехслойных кровельных панелей позволили установить закономерности развития НДС при изгибе, на основе чего определены границы надежной работы и методика расчета панелей при проектировании. Построены графики и таблицы зависимости несущей способности кровельных панелей, предназначенные для практического использования при проектировании.
3. Разработана методика расчета крепления кровельных панелей самонарезающими винтами при действии отрывающих пиковых ветровых нагрузок. Предложен способ усиления крепления и методика его расчета.
4. Разработана методика расчета кровельных панелей с применением МКЭ, позволяющая определять НДС при любых пролетах и условиях опирания и обеспечивающая надежность проектирования при любых вариантах нагружения и количестве пролетов.
5. Предложена достаточно простая инженерная методика расчета трехслойных панелей при изгибе по однопролетной и многопролетной схемам, сокращающая время проектирования при обеспечении надежности.
6. Разработанная на основании теории кинетической прочности методика определения времени старения клеевого слоя панели может использоваться для прогнозирования долговечности эксплуатации панелей в различных климатических зонах.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности образцов минераловатной плиты, фрагментов трехслойной панели (общее количество испытаний в сериях составило 72 шт).
2. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности трехслойных кровельных панелей на изгиб (общее количество испытаний в сериях составило 22 шт).
3. Результаты моделирования работы трехслойной кровельной панели с ортотропным средним слоем на изгиб при различных схемах работы в программных расчетных комплексах.
4. Результаты экспериментально-теоретических исследований крепления кровельной панели самонарезающими винтами при действии отрывающих пиковых ветровых нагрузок.
5. Инженерная методика расчета трехслойных кровельных панелей с ортотропным средним слоем и сильно профилированной верхней обшивкой при изгибе по однопролетной и двухпролетной схемам работы.
6. Результаты определения долговечности панелей на основе кинетической теории прочности.

**Внедрение результатов работы.**

Результаты исследований, графики и таблицы несущей способностей и методики расчета используются проектными и производственными организациями (ООО «Термостепс-МТЛ», ЗАО «Электрощит «Стройиндустрия», ООО «Нефтехимпроект» и др.), а также в учебном процессе Самарского архитектурно-строительного университета, что подтверждено актами о внедрении.

**Публикации и апробация работы**

Основные результаты содержания диссертационной работы нашли отражение в тридцати публикациях в отечественных и международных изданиях, в том числе шесть статей - в изданиях рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ и одна - в рекомендованной ВАК Украины. Результаты исследований докладывались на международных и всероссийских конференциях в городах Омске, Новосибирске, Одессе, Самаре.

**Объем и структура работы** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и списка литературы (107 наименований), включает 43 таблицы, 136 рисунков. Основное содержание диссертации изложено на 168 страницах машинописного текста.

**Личный вклад автора** состоит в следующем:

* в постановке задач и их решении, разработке экспериментальных стендов и установок, обработке и интерпретации экспериментальных данных,
* в разработке и проведении экспериментальных исследований по определению физико-механических свойств минераловатной плиты и образцов панели,
* организация и проведение экспериментальных испытаний трехслойных кровельных панелей на изгиб,
* разработка математических моделей в программных комплексах и анализ результатов расчетов с их использованием,
* разработке инженерной методики расчета трехслойных панелей с ортотропным средним слоем и сильно гофрированной обшивкой.

Автор выражает большую признательность и благодарит к.т.н, проф. Мосесова М.Д. за ценные советы и помощь в подготовке и выполнении экспериментальных исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе экспериментальных исследований определены физико-механические характеристики минераловатного заполнителя среднего слоя, материала обшивок и фрагментов кровельной панели при работе на растяжение, сжатие сдвиг. Проведенные исследования позволяют утверждать, что утеплитель имеет ярко выраженные ортотропные свойства.
2. В результате натурных испытаний определен характер поведения кровельных панелей при воздействии разовой и циклической нагрузок. Установлены особенности распределения напряжений и деформаций при линейной и нелинейной работе. Выявлены и установлены предельные разрушающие нагрузки и особенности разрушения панелей при однопролетной и двухпролетной схемах.
3. Разработана расчетная модель кровельной панели на основе МКЭ с учетом ортотропных свойств среднего слоя. Анализ напряженно-деформированного состояния панелей при однопролетной и двухпролетной схемах показал, что результаты расчета по предложенной методике обеспечивают сходимость с экспериментальными данными до 10%. Это говорит о достоверности результатов, полученных на основе предложенной расчетной модели и о надежности ее использования при проектировании.
4. Выполнены теоретические исследования устойчивости гофра панели, по результатам которых можно сделать вывод, что при приведенных в диссертации параметрах гофра исчерпание несущей способности по критерию потери устойчивости не происходит.
5. Выполнены экспериментальные и теоретические исследования узла крепления кровельных панелей и выявлено, что несущая способность крепления может быть недостаточной при действии пиковых отрицательных воздействий ветровой нагрузки. Разработано крепление кровельной панели и рекомендации по методике расчета усиления узлов крепления.
6. На основании экспериментально-теоретических исследований предложена инженерная методика расчета трехслойных кровельных панелей с маложестким утеплителем и обшивками разной изгибной жесткости при однопролетной и

многопролетной схемах работы, обеспечивающая надежную эксплуатацию панелей. Разработаны также практические рекомендации в виде графиков, существенно упрощающих процесс выбора рациональных параметров панелей при обеспечении их надежной эксплуатации.

7 С использованием кинетической теории прочности предложена методика по определению долговечности эксплуатации панелей.

Список используемой литературы

1. Александров А .Я., Брюккер Л.Э., Куршин А.М., Прусаков А.П. Расчет Трехслойных панелей. - М.: Оборонгиз, 1960.
2. Александров А.Я., Бородин М.Я., Павлов В.В. Конструкции с заполнителями из пенопластов под. ред. Александрова А.Я. - М.: Оборонгиз, 1962.
3. Александров А.Я., Трофимова Э.П. Определение приведенных упругих параметров сотовых заполнителей трехслойных панелей. Вопросы расчета элементов авиационных конструкций, вып. 2. - М.: Оборонгиз, 1959.
4. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек, главная редакция физико-математической литературы. - М.: Наука, 1974.
5. Паншин Б.И. Клеи и технология склеивания. - М.: Оборонгиз, 1960.
6. Батрак В.Е. Автореферат на соискание к.т.н. Исследование напряженно- деформированного состояния трехслойных панелей с учетом ползучести пенополиуретана. - М., 1982.
7. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. - М.: Высшая школа, 1961.
8. Бобряшов В.М. Результаты исследования долговечности волокнистых ТИМ в строительных конструкциях // Доклад на семинаре «Актуальные вопросы применения теплоизоляционных материалов в многослойных строительных конструкциях». М- 2010.
9. Бобрышев А.Н., Прочность и долговечность полимерных композитных материалов / В.Н.Козомазов, Р.В.Козомазов, А.В.Лахно, В.В.Тучков //Липецк: РПГФ «Юлис», 2006 - 170 с
10. Бровченко М.Д., Ткаченко П.А. Расчет трехслойных панелей симметричного по толщине строения. - «Вестник Львовского политехнического института, №113. Вопросы современного строительства», 1977.