

Фамилия Имя Отчество

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ С ПОКРЫТИЕМ С УЧЕТОМ
МОДУЛЯ СДВИГА МАТЕРИАЛА

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С 50-х годов XX века во всем мире строительные конструкции из технических тканей с покрытием стали активно внедряться во множество областей человеческой деятельности. Подобные сооружения имеют большое число неоспоримых достоинств (к примеру, архитектурная выразительность, легкость, быстрота монтажа и демонтажа, малый объем в транспортном состоянии и др.) и относительно малое количество недостатков (например, относительно малый срок службы материала, сложность определения несущей способности и действующих нагрузок и др.).

Увеличение в последнее время количества строительных конструкций из технических тканей с покрытием во всем мире требует более полного и детального исследования поведения материала под нагрузкой, работающего в составе строительных конструкций, с учетом его сложного напряженно-деформированного состояния. Строительным конструкциям и сооружениям из технических тканей с покрытием свойственна геометрическая нелинейность, а материалу физическая нелинейность, что осложняет аналитические и численные расчеты подобных конструкций под нагрузкой.

Степень разработанности темы исследования. Исследованием механических характеристик и поведения технических тканей с покрытием при лабораторных и натурных испытаниях занимались многие отечественные (Ермолов В.В., Шпаков В.П., Куприянов В.Н., Сулейманов А.М., Удлер Е.М., Шелихов Н.С., Кудрявцева В.И., Орас Р.Э., Михайлов В.В., Хованец В.А., Хорошилов Е.А., Чесноков А.В., Кривошапко С.Н., Скопенко В.А. и другие) и ЗАРУБЕЖНЫЕ западные (Ambroziak A., Klosowski P., Beccarelli P., Bridgens B., Cherif C., Colman A., Dinh T., Galliot C., Gosling P., Huntington C., Uhlemann J., Seidel M., Lewis W., Knippers J., Chen J., Zhang L., Zhang Y., Yingying Z.) и многие другие ученые. Аналитическими и численными расчетами строительных конструкций из технических тканей с покрытием и исследованием напряженно-деформированного состояния технических тканей с покрытием под различными воздействиями занимались, как отечественные ученые (Алексеев С.А., Бидерман В.Л., Друзь Б.И., Григорьев А.С., Магула В.Э., Усюкин В.И., Сулейманов А.М., Михайлов В.В., Чесноков А.В., Багмутов В.П., Берендеев Н.Н., Каюмов Р.А., Кожанов Д.А. и другие), так и зарубежные (Фрай Отто, Хауг Э., Харнах Р., Ишии К., Ambroziak A., Klosowski P., Argyris J., Ballhause D., Boljen M., Bruniaux P., Dinh T., Galliot C., Kato S., Kawabata S., King M., Kuwazuru O., Lecompte D., Odegard G., Pargana J., Peng X., Stubbs N., Tabiei A., Vandenkoer K., Хуе Р.), и многие другие исследователи.

Научно-техническая гипотеза. Учет сдвиговой жесткости позволяет полно и достоверно определить напряженно-деформированное состояние и прогнозировать поведение строительных конструкций из технических тканей с покрытием. Целью работы является оценка напряженно-деформированного состояния и уточнение методики расчета строительных конструкций из технических тканей с покрытием с учетом модуля сдвига материала.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Выполнить обзор и провести анализ современных отечественных и зарубежных методик и результатов лабораторных и натурных испытаний технических тканей с покрытием, а также математических моделей, описывающих поведение материала под нагрузкой, работающего в составе строительных конструкций.
2. Провести экспериментальные и численные исследования технических тканей с покрытием с целью определения основных механических характеристик материала, необходимых для расчета строительных конструкций из технических тканей с покрытием.
3. Разработать методику экспериментальных исследований строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида при несимметричной равномерно-распределенной нагрузке.
4. Разработать методику численных исследований строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида при несимметричной равномерно-распределенной нагрузке, и выполнить сопоставление результатов испытаний с численными данными, полученными с использованием программного комплекса ANSYS.
5. Изучить влияние модуля сдвига материала на напряженно-деформированное состояние строительной конструкции из технических тканей с покрытием в форме гиперболического параболоида.
6. Уточнить методику расчета строительных конструкций из технических тканей с покрытием с учетом влияния модуля сдвига.

Объектом исследования является строительная конструкция из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида.

Предметом исследования являются напряжения и деформации в технических тканях с покрытием, работающих в составе строительных конструкций, с учетом модуля сдвига материала.

Научная новизна работы:

1. Разработана расчетно-экспериментальная методика по определению модуля сдвига в технических тканях с покрытием.
2. Результаты экспериментальных и численных исследований напряженно-деформированного состояния строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида.
3. Исследовано влияние модуля сдвига материала на напряженно-деформированное состояние строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида.
4. Впервые предложена форма образца для лабораторных испытаний технических тканей с покрытием при одноосном внеосевом растяжении, позволяющая определить основные механические характеристики материала, необходимые для расчетов строительных конструкций из технических тканей с покрытием.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Проведен всесторонний анализ современных методик и результатов лабораторных и натурных испытаний технических тканей с покрытием, а также анализ

математических моделей, описывающих поведение технических тканей с покрытием под нагрузкой, работающих в составе строительных конструкций, что позволило произвести их систематизацию, выявить преимущества и недостатки.

По результатам лабораторных испытаний установлены характерные особенности разрушения технических тканей с покрытием под действием нагрузок.

Изучены качественные и количественные зависимости влияния значения модуля сдвига на напряженно-деформированное состояние строительных конструкций из технических тканей с покрытием.

По результатам экспериментального и численного исследования строительной конструкции из технических тканей с покрытием в форме гиперболического параболоида разработаны рекомендации к численным расчетам в программном комплексе ANSYS.

Разработана расчетно-экспериментальная методика по определению модуля сдвига, позволяющая учитывать его реальное значение при расчетах строительных конструкций из технических тканей с покрытием.

Уточнена методика расчета несущей способности технических тканей с покрытием, работающих в составе строительных конструкций с учетом влияния модуля сдвига на их напряженно-деформированное состояние.

Методология и методы исследования.

Методологической основой работы послужила нормативная и научно-техническая отечественная и зарубежная литература, экспериментальные и теоретические данные, полученные отечественными и зарубежными учеными в области изучения строительных конструкций, содержащих в своем составе техническую ткань с покрытием в качестве ограждающего и несущего элемента, а также согласование исходных положений с общепринятыми гипотезами и методами научных исследований, базирующимися на физических законах с использованием общих методов строительной механики, теории упругости, теории расчета мягких оболочек и метода конечных элементов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- расчетно-теоретическая методика по определению значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием;
- методика расчета строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида с учетом модуля сдвига;
- методика лабораторных испытаний материала при одноосном внеосевом растяжении;
- результаты экспериментальных и численных исследований напряженно-деформированного состояния строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается:

- применением известных и апробированных принципов и методов строительной механики;

- проведением лабораторных испытаний технических тканей с покрытием по методикам нормативных документов;
- использованием в испытаниях экспериментального оборудования и приборов, прошедших метрологическую поверку;
- обработкой результатов экспериментов статистическими методами;
- применением в численных исследованиях программного комплекса ANSYS;
- хорошей сходимостью результатов испытания строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида с результатами численного расчета в ANSYS.

Апробация работы. Основные результаты, полученные в ходе диссертационной работы, докладывались, обсуждались и получили одобрение на международных, всероссийских и межвузовских конференциях и семинарах:

1. XIX Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», Москва, 27-29 апреля, 2016;
2. II Российская научно-практическая конференция "Инженерные технологии MSC Software для высших учебных заведений", Москва, 14 апреля, 2016;
3. Молодежный международный научно-практический семинар молодых ученых и студентов «Современные исследования в области прикладных инженерных наук», Москва, 6-8 декабря, 2016;
4. II Международная научно-практическая конференция "Инженерные технологии MSC Software для высших учебных заведений", Москва, 19 апреля, 2017;
5. XX Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности», Москва, 26-28 апреля, 2017;
6. Международная конференция Structural Membranes 2017 VIII International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Munich, Germany, 9-11 October, 2017.

В полном объеме работа была заслушана и одобрена на заседании НТС НИУ МГСУ (выписка из протокола №6 от 28.05.2018 г.).

Внедрение результатов исследований. Результаты работы применены в проектной и практической деятельности организации ООО ПСБ «ВЕРТЕКО» при проектировании тентового навеса в форме гиперболического параболоида размерами 15x15 м в плане для площадки отдыха в пионерском лагере Артек, Крым. Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты диссертационной работы соответствуют 3 пункту паспорта научной специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»:

3. Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности.

Личный вклад автора заключается в постановке задачи, разработке методик постановки и проведения экспериментальных и численных исследований;

оценке их результатов; разработке расчетно-экспериментальной методики по определению значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием. Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах, из них 5 публикаций в российских рецензируемых научных журналах согласно перечню ВАК и 3 публикации в изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Работа изложена на 246 страницах машинописного текста, включающего 15 таблиц, 147 рисунков и фотографий, список литературы из 270 наименований, в том числе 166 иностранных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы работы, определены объект и предмет исследования, цели и задачи, предложена научно-техническая гипотеза, обозначена новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлены основные виды и области применения строительных конструкций из технических тканей с покрытием, их основные достоинства и недостатки, а также приведен современный отечественный и зарубежный опыт проектирования подобных конструкций. Описаны эксплуатационные свойства современных технических тканей с покрытием, применяемых в строительных конструкциях, их строение и состав, технология изготовления материала. Рассмотрены три основные теории расчета строительных конструкций из технических тканей с покрытием: безмоментная теория оболочек, теория больших деформаций мягких оболочек, техническая теория мягких оболочек (теория малых деформаций). Показаны основные виды напряженно-деформированного состояния материала, работающего в составе строительной конструкции, представлен механизм возникновения касательных напряжений в технических тканях с покрытием.

Проведенный анализ научных исследований по аналитическим и численным расчетам строительных конструкций из технических тканей с покрытием показал, что зачастую модулем сдвига материала пренебрегают (то есть игнорируют касательные напряжения). При расчетах строительных конструкций из технических тканей с покрытием принимается гипотеза о плоском напряженно-деформированном состоянии, поскольку толщина материала мала по сравнению с размерами конструкции в плане. Согласно стандарту ASCE 55-16 физические соотношения записывается в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \sigma_w \\ \sigma_f \\ \tau_{wf} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_w \\ \varepsilon_f \\ \gamma_{wf} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{11} = \frac{E_1}{1 - \mu_1 \mu_2}, C_{22} = \frac{E_2}{1 - \mu_1 \mu_2}, C_{12} = \frac{\mu_2 E_1}{1 - \mu_1 \mu_2}, C_{21} = \frac{\mu_1 E_2}{1 - \mu_1 \mu_2}, C_{66} = G_{12}. \quad (2)$$

где σ - нормальные напряжения, τ - касательные напряжения, ε - деформации, γ - сдвиговые деформации, C - коэффициенты в физических соотношениях, определяющие зависимость между напряжениями и деформациями, E - модуль

Юнга, G - модуль сдвига, μ - коэффициент Пуассона; индекс 1 - принят для величин в направлении нитей основы, 2 - для величин в направлении нитей утка. Как видно из выражений (1) и (2), касательные напряжения прямо пропорциональны значению модуля сдвига материала. Игнорирование касательных напряжений или использование некорректного значения модуля сдвига при проектировании часто приводит к неправильной оценке напряженно-деформированного состояния технической ткани с покрытием, работающей в составе строительных конструкций.

В большинстве последних исследований в этой области зарубежными учеными (Bridgens B.N., Colman A.G., Chen S., Dinh T.D., Ding X., Gosling P.D., Galliot C., Luchsinger R.H., Yi H., Zhang L.) показана важность учета модуля сдвига при расчете строительных конструкций и сооружений из технических тканей с покрытием, поскольку в некоторых случаях неучет касательных напряжений ведет к завышенной прочности материала, полученной расчетным путем. Также, недостаточно изучен вопрос о влиянии значения модуля сдвига на напряженно-деформированное состояние технических тканей с покрытием, работающих в составе строительных конструкций.

Проведенный анализ теоретических и экспериментальных исследований позволил конкретизировать сформулированные во введении цели и задачи работы.

Во второй главе представлен анализ практически всех существующих отечественных и зарубежных современных методик, и результатов лабораторных и натурных испытаний технических тканей с покрытием, который позволил произвести их систематизацию и выявить преимущества и недостатки.

Модуль сдвига наряду с модулем Юнга и коэффициентом Пуассона является одной из главных механических характеристик технической ткани с покрытием. Особое внимание в работе уделено методикам и результатам испытаний технических тканей с покрытием для определения значения модуля сдвига материала. Основным общим недостатком существующих проанализированных методик – трудоемкость проведения исследований и необходимость наличия специального испытательного оборудования. Поэтому, назрела необходимость в создании более простой в физическом понимании и инженерном исполнении расчетно-экспериментальной методики для определения значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием.

Одной из основных задач работы была разработка усовершенствованной методики проведения лабораторных испытаний с целью использования ее, в качестве составляющей части предложенной расчетно-экспериментальной методики по определению значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием. Как правило, производитель материала не приводит в своих технических каталогах значение модуля сдвига. Это ведет к невозможности корректного численного моделирования работы технических тканей с покрытием под нагрузкой и неадекватному проектированию строительных конструкций и сооружений. В отечественной литературе практически не встречаются исследования поведения материала при внеосевом растяжении с углами 15° , 30° , 45° , 60° , 75° (0° - направление вдоль нитей основы, 90° - вдоль нитей утка), а необходимость в

этом исследовании существует, так как, в реальных конструкциях возможно воздействие растягивающих усилий под некоторым углом к нитям. Также, необходима оценка предельной разрывной прочности при растяжении технической ткани с покрытием под разными углами, так как в технических каталогах на материал эти данные отсутствуют.

В работе были проведены лабораторные испытания при одноосном осевом и внеосевом растяжении, а также при двухосном растяжении со сдвигом двух разных видов технических тканей с покрытием, изготовленных по технологии Precontraint (французская компания Serge Ferrari) и без нее (немецкая фирма Mehler). При изготовлении технических тканей с покрытием компания Serge Ferrari применяет запатентованную технологию Precontraint (сбалансированное и постоянное натяжение нитей основы и утка перед нанесением полимерного покрытия на текстильную основу), которая существенно снижает деформативность материала по направлению нитей утка по сравнению с материалом, изготовленным без данной технологии. В зарубежной литературе подобному исследованию посвящена единственная работа Zhang Y.

В проведенных лабораторных экспериментах испытательное оборудование представляло собой разрывную машину (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Оптический метод корреляции цифровых изображений был выбран для измерения полей перемещений точек и деформаций на поверхности технических тканей с покрытием, а также для вычисления коэффициента Пуассона (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). При одноосном вне осевом растяжении данный метод не приемлем в связи с закручиванием образцов, возникающем уже в самом начале эксперимента, что объясняется особенностью структуры технических тканей с покрытием.



Рисунок 1. Общий вид разрывной машины в лабораторных испытаниях

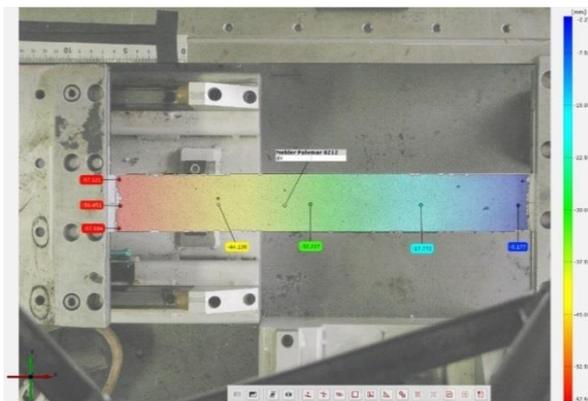


Рисунок 2. Измерение полей перемещений на поверхности образца с помощью метода корреляции цифровых изображений

Подготовка образцов и методика проведения испытаний при одноосном осевом растяжении была выполнена в соответствии с ГОСТ 30303-95 «Ткани с резиновым или пластмассовым покрытием. Определение разрывной нагрузки и удлинения при разрыве».

В нормативных документах отсутствует методика испытания при одноосном внеосевом растяжении технических тканей с покрытием. По результатам пред-

варительных лабораторных испытаний была найдена форма образца, основным критерием качества которой служил характер разрушения материала. В научной литературе выделяют три основных вида разрушения технических тканей с покрытием при одноосном вне осевом растяжении: разрыв нитей, вытягивание нитей из покрытия и комбинированный. Все указанные виды разрушения были получены на образцах в форме гантели с размерами в узкой (средней) части образца 20x100 мм (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Корректность определенной формы образца была доказана полученными в ходе лабораторных испытаний всеми тремя видами разрушения технической ткани с покрытием при одноосном внеосевом растяжении (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

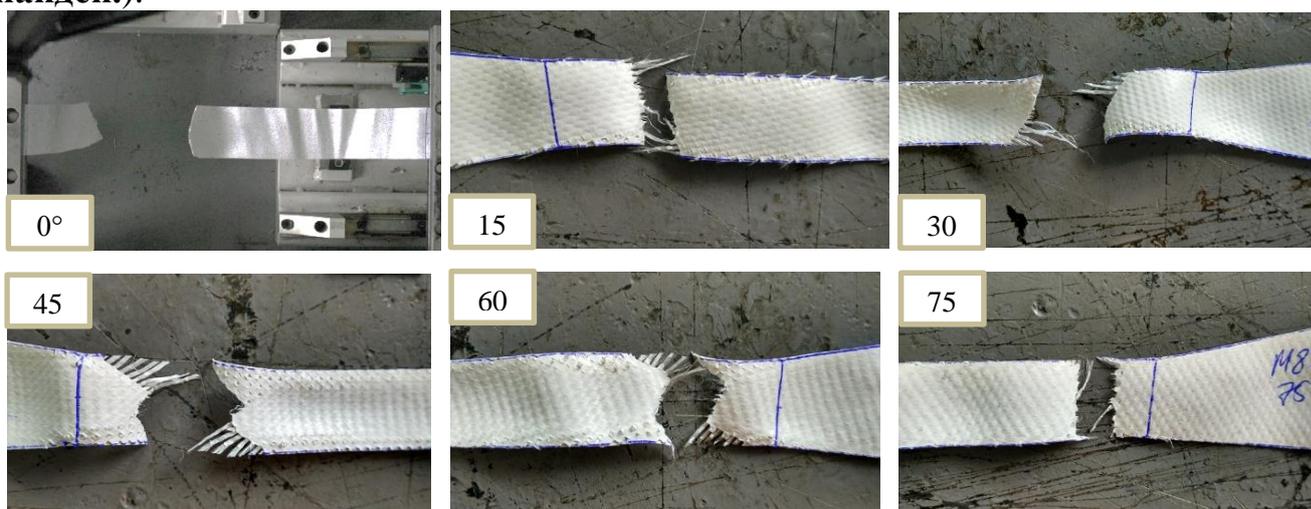


Рисунок 3. Основные виды разрушения технических тканей с покрытием при одноосном внеосевом растяжении: разрыв нитей (0°, 15°, 75°), вытягивание нитей (45°), комбинированный (30°, 60°)

По результатам лабораторных испытаний при одноосном внеосевом растяжении были построены графики (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**), на которых показана зависимость предельной прочности материала при растяжении от угла приложения нагрузки.

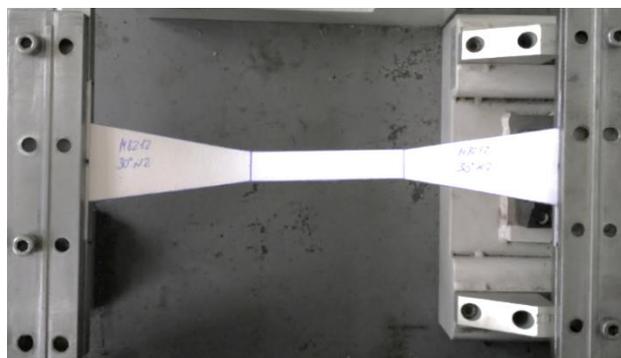


Рисунок 4. Образец технической ткани с покрытием в форме гантели для испытания при одноосном внеосевом растяжении

Рисунок 5. Предельная разрывная прочность технических тканей с покрытием при одноосном осевом и внеосевом растяжении

По результатам обработки экспериментальных данных были построены графики зависимостей напряжений от деформаций, в которых наглядно прослеживается физическая нелинейность материала (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Было установлено, что коэффициент Пуассона не является постоянной величиной.

Предельная разрывная прочность материала в испытаниях при растяжении при приближении к углу 45° уменьшается (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**), а деформации увеличиваются (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Предельная разрывная прочность при растяжении по направлению нитей утка значительно ниже, чем у нитей основы. Это объясняется сложной структурой технических тканей с покрытием из-за особенностей производства материала.

На рисунке **Ошибка! Источник ссылки не найден.** отчетливо видно, что у технической ткани с покрытием компании Serge Ferrari, изготовленной по технологии Preconstraint, работа материала под нагрузкой по направлению нитей утка (90°) более идентична с работой нитей основы (0°), чем у технической ткани с покрытием Polymar 8212, изготовленной без данной технологии.

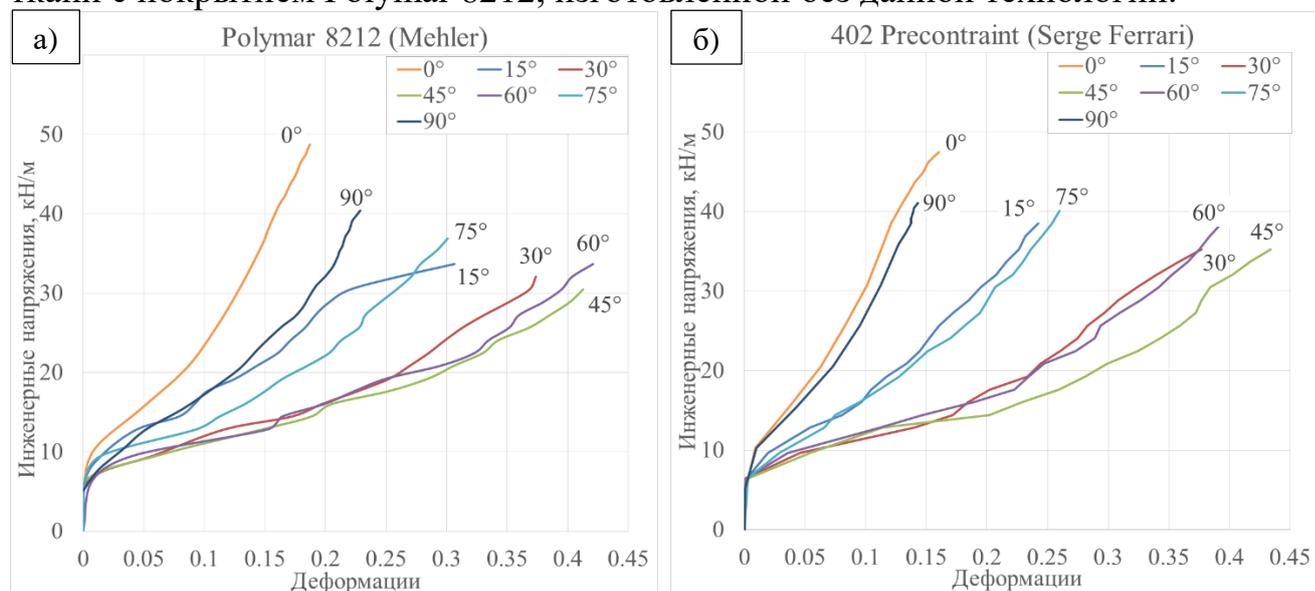


Рисунок 6. Графики зависимостей напряжений от деформаций при одноосном растяжении материала: а) Polymar 8212, б) 402 Preconstraint

Для подтверждения предложенной в работе расчетно-экспериментальной методики по определению значения модуля сдвига в материале были проведены лабораторные испытания при двухосном растяжении со сдвигом. Данный вид испытания необходим для создания сложного напряженно-деформированного состояния с одновременным действием нормальных и касательных напряжений в технической ткани с покрытием. Коэффициент соотношения нагрузки по основе и утку в лабораторных испытаниях принимался: 1:1, 1:2, 1:4 (основа:уток).

На рисунке (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**) представлено измерение полей перемещений точек на поверхности образца при использовании оптического метода корреляции цифровых изображений. По результатам испытаний были построены графики зависимостей напряжений от деформаций (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

Результаты проведенных лабораторных испытаний подтвердили, что модуль сдвига является важной механической характеристикой, влияющей на напряженно-деформированное состояние материала, а также явились предпосылкой создания новой расчетно-экспериментальной методики по определению значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием.

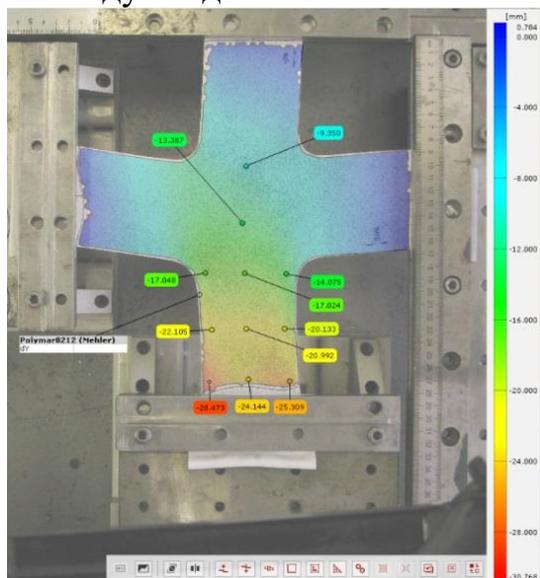


Рисунок 7. Измерение полей перемещений на поверхности образца по направлению нитей утка при двухосном растяжении со сдвигом

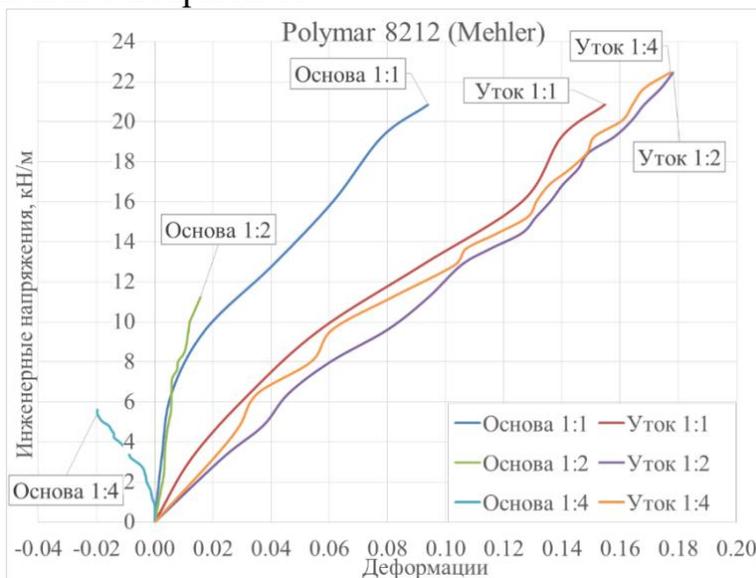


Рисунок 8. Графики зависимостей напряжений от деформаций при двухосном растяжении со сдвигом с разным соотношением нагрузок

В третьей главе представлен анализ современных математических моделей, описывающих поведение технических тканей с покрытием под нагрузкой, работающих в составе строительных конструкций, который позволил выявить их преимущества и недостатки, и определить возможность адекватного применения моделей для описания поведения материала под нагрузкой.

В работе показано влияние типа ткацкого переплетения на напряженно-деформированное состояние технических тканей с покрытием по результатам численного моделирования поведения материала под нагрузкой на микроуровне. Выявлено, что различные типы ткацких переплетений при одноосном напряженно-деформированном состоянии не оказывают существенного влияния на напряжения в материале (различие от 1% до 3%). Однако тип ткацкого переплетения оказывает существенное влияние на деформации технических тканей с покрытием (различие от 10% до 25%). Менее деформативный тип ткацкого переплетения полотняный, более деформативный - «рогожка 2x2».

Всесторонний анализ исследований, проведенных в работе Vandenkoer K., которая посвящена численным экспериментам, имитирующим проведенные лабораторные испытания при растяжении технических тканей с покрытием, выявил возможность применения для учета физически нелинейного ортотропного поведения материала под нагрузкой упруго-пластичную ортотропную модель по критерию текучести Хилла. В работе Vandenkoer K. показана хорошая качественная и количественная корреляция между результатами лабораторных испытаний и численных экспериментов с применением данной модели.

В настоящей диссертации была разработана расчетно-экспериментальная методика (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**) по определению значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием, суть которого заключается в последовательных и совмещенных между собой теоретических и экспериментальных исследованиях. Первая часть предложенной расчетно-экспериментальной методики – экспериментальная, состоящая из лабораторных испытаний при одноосном осевом и вне осевом растяжении. Вторая часть - теоретическая, включающая численные эксперименты (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**), имитирующие проведенные лабораторные испытания.



Рисунок 9. Блок-схема расчетно-экспериментальной методики по определению значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием

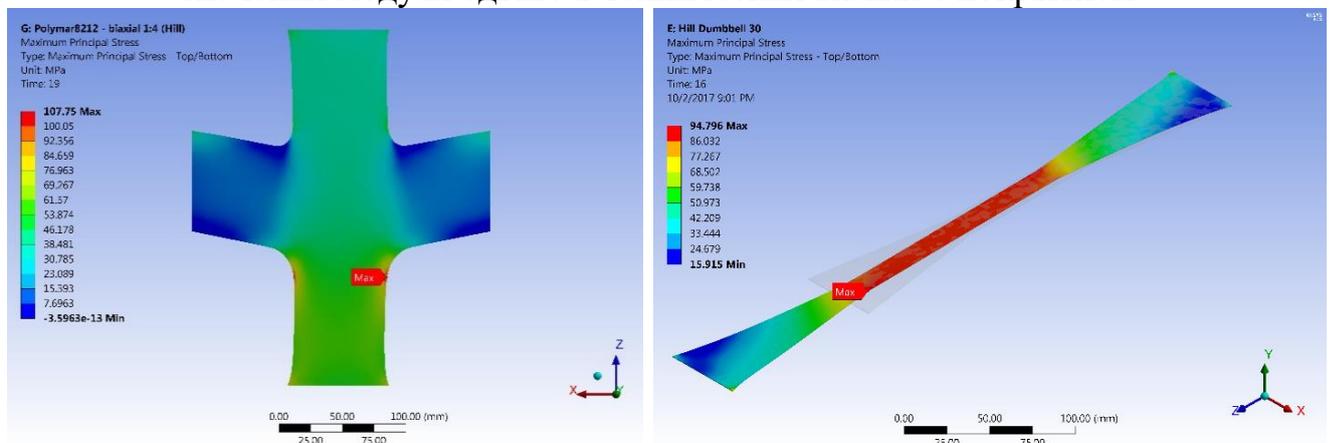


Рисунок 10. Напряженно-деформированное состояние технической ткани с покрытием в численных экспериментах

В численных исследованиях использована физически линейная и нелинейная модели поведения материала под нагрузкой, а также показана возможность применения критериев прочности композитных материалов к оценке и прогнозированию предельной прочности при растяжении технических тканей с покрытием (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

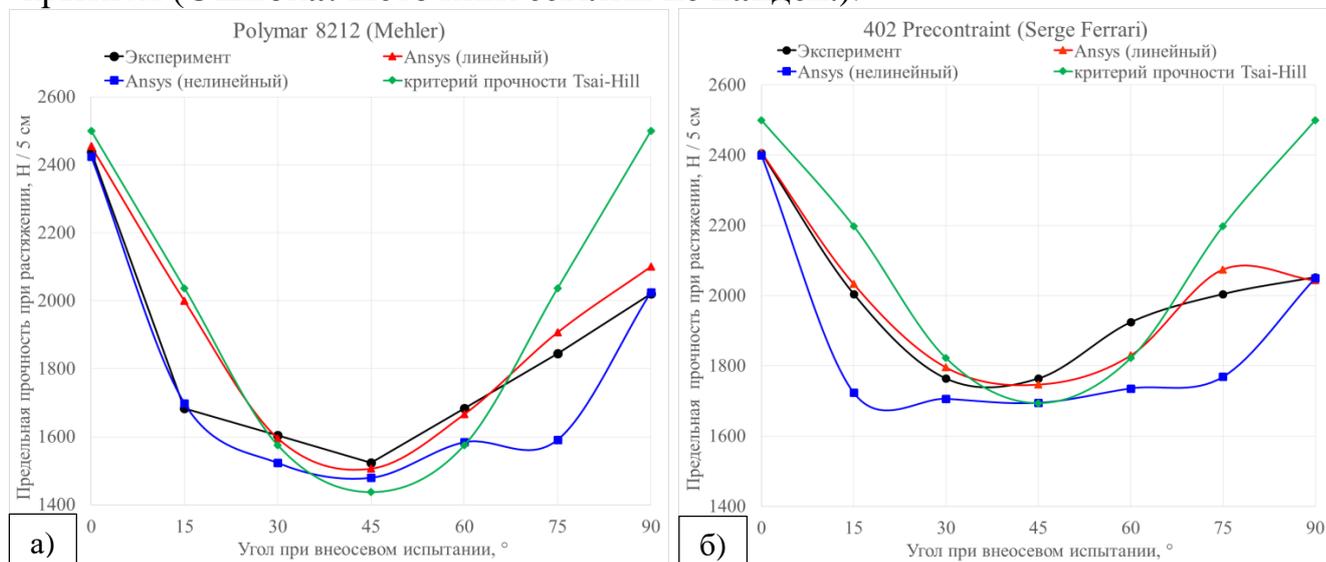


Рисунок 11. Сравнение предельной разрывной прочности технической ткани с покрытием при одноосном осевом и внеосевом растяжении: а) Polymar 8212, б) 402 Precontraint

В таблице **Ошибка! Источник ссылки не найден.Ошибка! Источник ссылки не найден.Ошибка! Источник ссылки не найден.** приведены коэффициенты надежности кратковременной прочности, вычисленные по результатам лабораторных испытаний и с помощью критериев прочности в численных экспериментах. Под коэффициентом надежности кратковременной прочности в данном случае подразумевается отношение предельной разрывной прочности материала при растяжении по техническим каталогам к разрывному усилию, полученному при лабораторном испытании в момент разрушения технической ткани с покрытием.

По результатам экспериментально-теоретических исследований, проведенных в третьей главе, сделаны следующие основные выводы:

- найдено минимально необходимое и достаточное количество лабораторных испытаний для определения основных механических характеристик материала для численного моделирования работы технических тканей с покрытием под нагрузкой, работающих в составе строительных конструкций;
- выявлено, что касательные напряжения вносят существенный вклад в напряженно-деформированное состояние технических тканей с покрытием при одноосном внеосевом и двухосном растяжении со сдвигом;
- в целом, в численных исследованиях с применением физически линейной и нелинейной ортотропной модели поведения материала под нагрузкой и прогнозирования с помощью критерия прочности Tsai-Hill предельной разрывной прочности при растяжении прослеживается хорошая корреляция с лаборатор-

ными испытаниями, кроме углов 15° и 75° , что можно объяснять особенностями сложной структуры технических тканей с покрытием;

- показано, что критерии прочности Tsai-Hill и Hashin адекватно подходят для прогнозирования предельной прочности материала при растяжении при одноосных осевых и внеосевых испытаниях, а при двухосном растяжении со сдвигом с разным соотношением нагрузок - критерий прочности Yeh-Stratton;
- предложена расчетно-экспериментальная методика по определению значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием по результатам экспериментально-теоретических исследований поведения материала под нагрузкой, обладающей Яйй по сравнению с существующими методиками следующими преимуществами:

- для проведения испытаний необходимо лишь наличие одной одноосной разрывной машины;
- не требует высоких навыков от исследователя и дополнительного оборудования;
- сокращает временные и материальные затраты;
- увеличивает скорость проведения и обработки результатов испытаний.

Таблица 1. Сравнение коэффициентов надежности кратковременной прочности по различным критериям прочности

| Лабораторные испытания при одноосном осевом и внеосевом растяжении Polymar8212 | | | | | |
|--|---|-----------|--------------|--------|--------|
| Угол при испытании | Критерий прочности / Коэффициент надежности кратковременной прочности | | | | |
| | Эксперимент | Tsai-Hill | Yeh-Stratton | Hashin | Norris |
| 0° | 1.03 | 1.31 | 1.15 | 1.34 | 1.33 |
| 15° | 1.48 | 1.64 | 1.87 | 1.76 | 1.64 |
| 30° | 1.56 | 1.69 | 2.15 | 1.78 | 1.69 |
| 45° | 1.64 | 1.61 | 2.09 | 1.59 | 1.61 |
| 60° | 1.48 | 1.84 | 2.28 | 1.61 | 1.84 |
| 75° | 1.36 | 1.22 | 1.48 | 1.31 | 1.22 |
| 90° | 1.24 | 1.45 | 1.20 | 1.45 | 1.45 |
| Лабораторные испытания при двухосном растяжении со сдвигом Polymar8212 | | | | | |
| Соотношение нагрузок | Критерий прочности / Коэффициент надежности кратковременной прочности | | | | |
| | Эксперимент | Tsai-Hill | Yeh-Stratton | Hashin | Norris |
| 1:1 | 2.46 | 2.19 | 2.56 | 2.09 | 2.19 |
| 1:2 | 2.23 | 2.02 | 2.38 | 1.63 | 2.02 |
| 1:4 | 2.23 | 1.97 | 2.31 | 1.61 | 1.97 |

В четвертой главе было проведено испытание строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида при несимметричной равномерно-распределенной нагрузке.

Основными целями проведения испытания были:

- проверка выдвинутой научно-технической гипотезы о том, учет сдвиговой жесткости позволяет полно и достоверно определить напряженно-деформированное состояние и прогнозировать поведение строительных конструкций из технической ткани с покрытием под действием нагрузки;
- проверка достоверности разработанной расчетно-экспериментальной методики по определению значения модуля сдвига в материале;
- проверка возможности адекватного применения в численных расчетах строительных конструкций в программе ANSYS нелинейной ортотропной модели поведения технических тканей с покрытием под нагрузкой - упруго-пластичной ортотропной модели по критерию текучести Хилла.

Для проведения эксперимента была разработана методика проведения испытания строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида. По предварительным численным исследованиям в ANSYS значение силы предварительного натяжения было принято равным 3 кН. Предварительное натяжение конструкции на заданную величину силы осуществлялось с помощью талрепов во всех четырех опорах конструкции. Основные размеры исследуемой конструкции в форме гиперболического параболоида и металлического стенда для испытания представлены на рисунке (Ошибка! Источник ссылки не найден.). На поверхность материала были нанесены контрольные точки для возможности отслеживания перемещений (Ошибка! Источник ссылки не найден.).

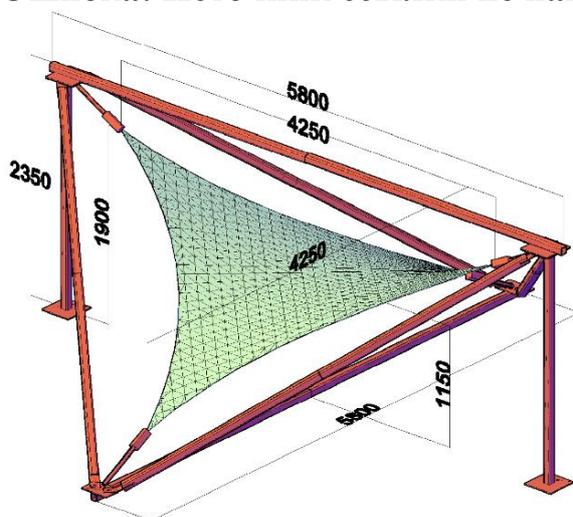


Рисунок 12. Основные размеры «ги-пара» и металлического стенда в эксперименте, мм

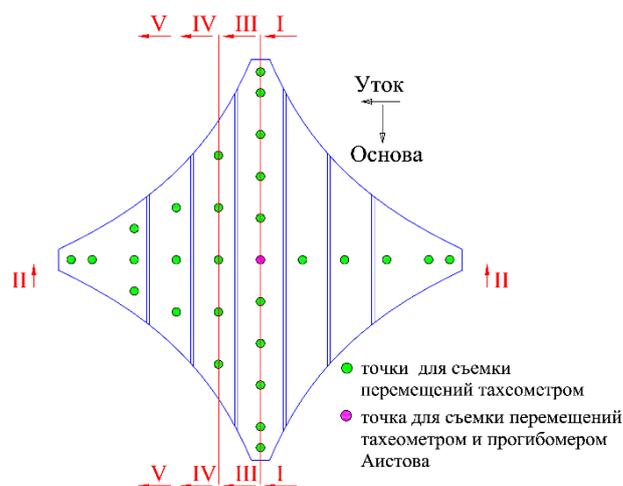


Рисунок 13. Контрольные точки для отслеживания перемещений конструкции

Для определения перемещений был использован измерительный прибор – тахеометр марки NTS-350. Была использована трехэлементная прямоугольная конструкция тензорозеток совместно с индикатором часового типа, применявшегося для контроля показателей измерений с помощью тензорезисторов, и установленного в специально разработанные под него алюминиевые элементы (Ошибка! Источник ссылки не найден.). Для определения усилий в опорах в

конструкции был установлен датчик силы CAS SBA-1 (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**) и динамометр ДПУ-5-2.

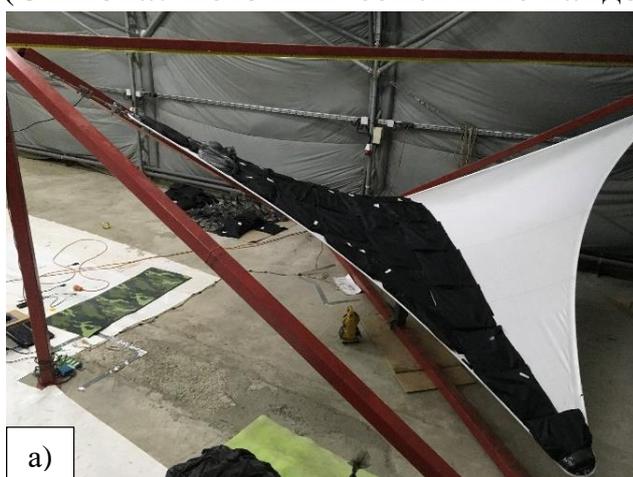


Рисунок 14. Тензорозетка и контроль деформаций тензорезисторов с помощью индикаторов часового типа



Рисунок 15. Общий вид положения датчика силы CAS SBA-1

При испытании конструкции суммарная величина несимметричной равномерно-распределенной нагрузки составила 1,5 кПа. Нагрузка прикладывалась к конструкции шестью ступенями, величина каждой составляла 0,25 кПа (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).



а)



б)

Рисунок 16. Схема приложения нагрузки на конструкцию в эксперименте:
а) 1 ступень (0,25 кПа), б) 6 ступень (1,50 кПа)

До проведения основного испытания конструкции в форме гиперболического параболоида была исследована релаксация напряжений, что позволило сделать следующие выводы:

- релаксация напряжений (около 40% напряжений) интенсивно проявляется впервые 30-40 минут сразу после натяжения конструкции;
- чем с большим усилием производится предварительное натяжение конструкции, тем интенсивнее в начальный этап времени происходит релаксация напряжений;
- релаксация напряжений по направлению вдоль нитей основы и утка имеет качественно СХОЖИЙ одинаковый характер.

По результатам проведенного испытания конструкции на каждом этапе нагружения были получены усилия на опорах, перемещения и деформации характерных точек, общий вид напряженно-деформированного состояния конструкции (рисунок **Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

В программном комплексе ANSYS был выполнен численный эксперимент, имитирующий проведенное испытание конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида. Для определения РАЦИОНАЛЬНОГО оптимального размера конечного элемента были выполнены предварительные численные расчеты. С учетом габаритов строительной конструкции был принят максимальный размер ребра конечного элемента равным 50 мм. Указанный размер конечного элемента обеспечил моделирование образования складок, совпадающих с реальным распределением складок в конструкции в эксперименте. Направление главных осей материала (направление вдоль нитей основы и утка) было согласовано в соответствии с расположением главных осей в технической ткани с покрытием в исследуемой конструкции. Как и в испытании, нагрузка в численных расчетах прикладывалась шестью ступенями по 0,25 кПа.

В численных исследованиях были использованы две модели поведения материала под нагрузкой: физически линейная ортотропная модель и физически нелинейная ортотропная модель (упруго-пластичная ортотропная модель по критерию текучести Хилла).

По итогам численных исследований были получены результаты, которые были сопоставлены с результатами, полученными при испытании конструкции.

На рисунках (**Ошибка! Источник ссылки не найден.** и **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) представлено сравнение результатов вертикальных перемещений исследуемых точек и сравнение результатов усилий на опорах конструкции. На рисунке (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**) показаны характерные сечения, вдоль которых были отслежены и вычислены перемещения точек конструкции. На рисунке (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**) показаны результаты по напряжениям и деформациям в численных расчетах с физически линейной и физически нелинейной ортотропной моделью поведения материала под нагрузкой.

По результатам сравнения численных исследований и испытания конструкции было выявлено, что значение модуля сдвига материала, определенное в разработанной расчетно-экспериментальной методике в работе, позволяет получить реальное значение модуля сдвига при расчетах строительных конструкций из технических тканей с покрытием.

В работе также изучено влияние сдвиговой жесткости материала на напряженно-деформированное состояние конструкции из технической ткани с покрытием с помощью численных расчетов в ANSYS, что позволило подтвердить выдвинутую в работе научно-техническую гипотезу.

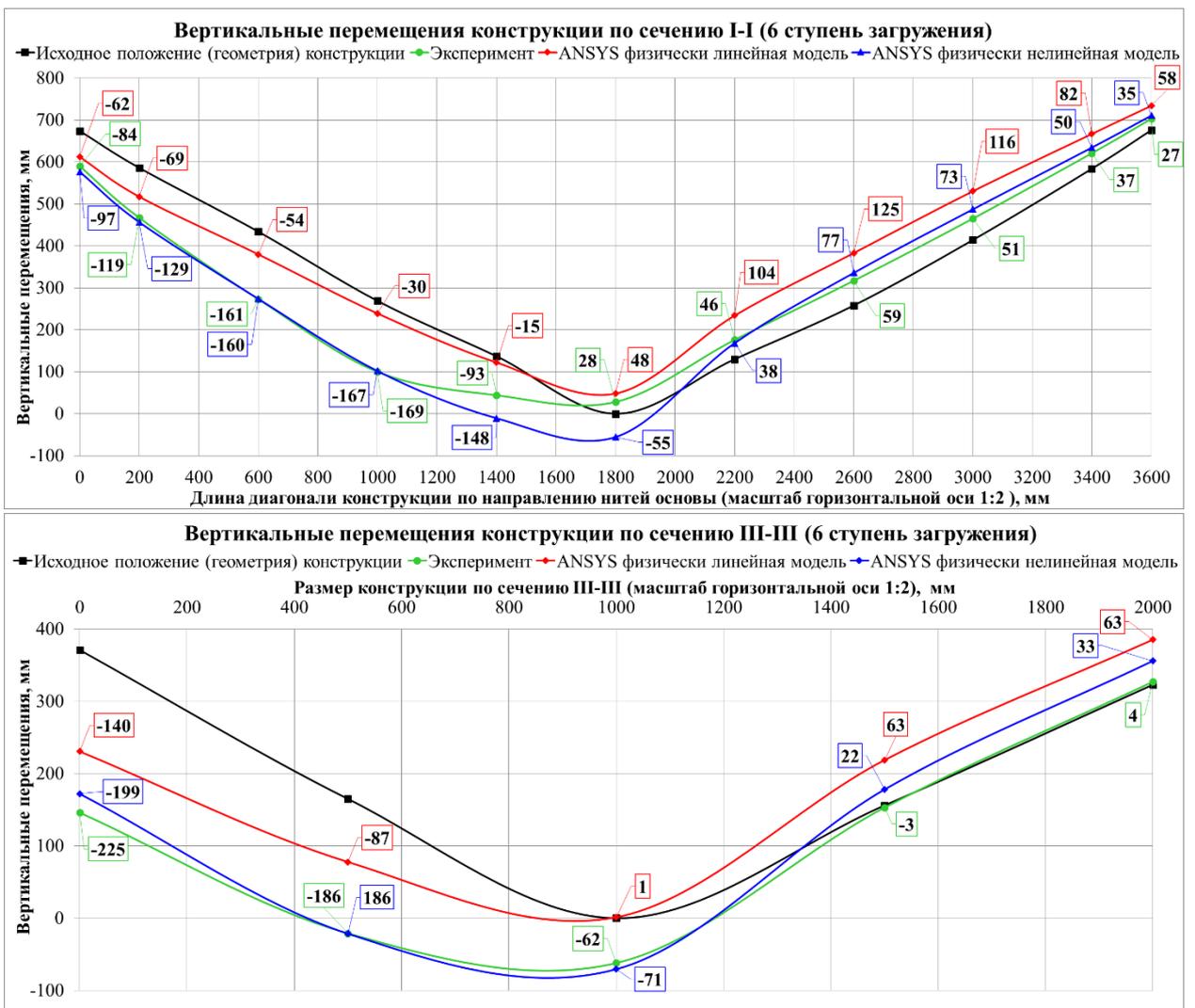


Рисунок 17. Сравнение результатов вертикальных перемещений исследуемых точек конструкции между испытанием и численными расчетами СЪЕХАЛО

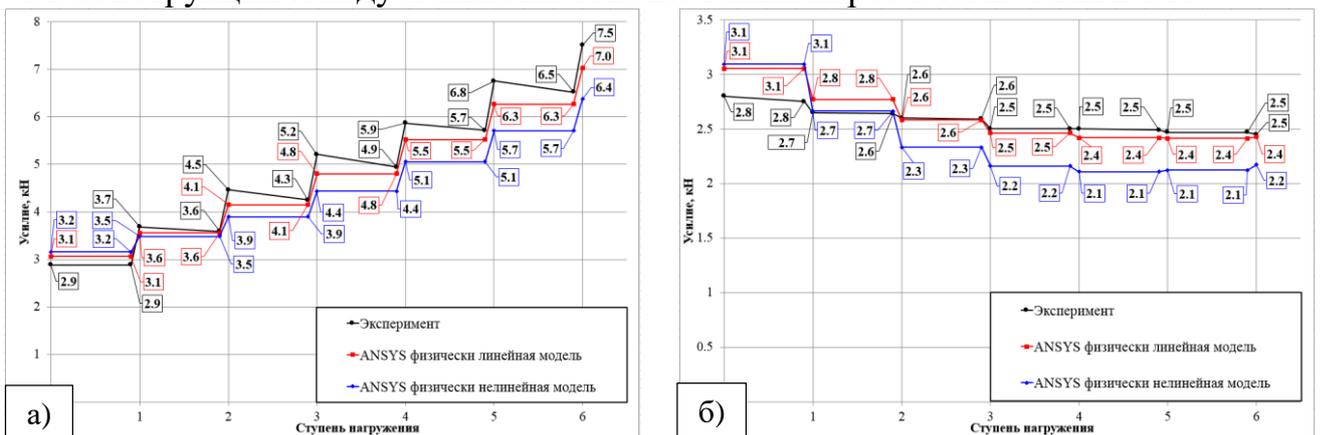


Рисунок 18. Сравнение усилий на опорах конструкции в форме гиперболического параболоида между испытанием и численными расчетами по направлению нитей: а) основы, б) утка

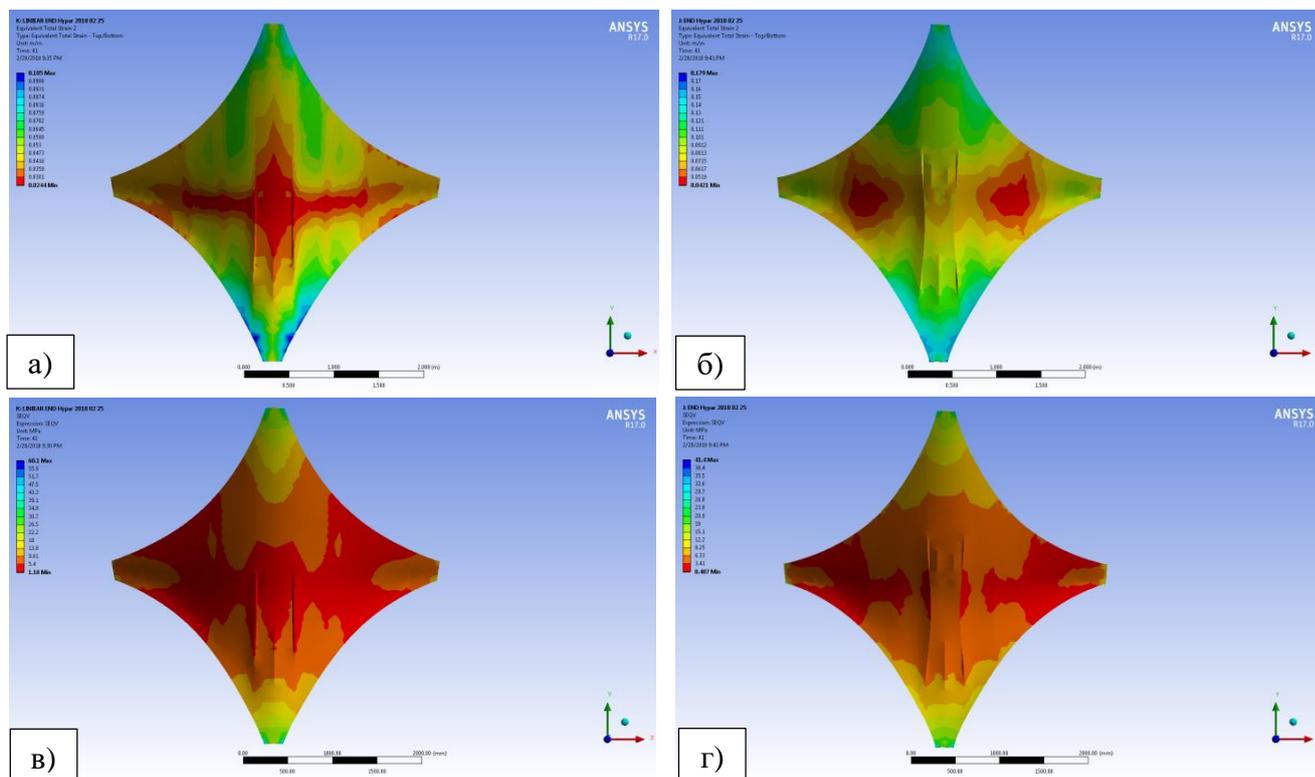


Рисунок 19. Результаты напряжений и деформаций в численных расчетах с физически линейной ортотропной моделью (слева) и физически нелинейной ортотропной моделью (упруго-пластичная ортотропная модель по критерию текучести Хилла) - справа: а), б) полные деформации; в), г) эквивалентные напряжения. По результатам проведенных испытаний и численных исследований:

- доказана достоверность разработанной расчетно-экспериментальной методики по определению значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием;
- показана возможность адекватного применения в программе ANSYS нелинейной ортотропной модели поведения материала под нагрузкой (упруго-пластичная ортотропная модель по критерию текучести Хилла);
- доказано, что модуль сдвига материала является важной механической характеристикой, влияющей на напряженно-деформированное состояние строительных конструкций из технических тканей с покрытием;
- на основании проведенных экспериментально-теоретических исследований даны рекомендации к численным методам расчета конструкций из технических тканей с покрытием.

В приложениях приведены рекомендации к численным расчетам строительных конструкций из технических тканей с покрытием, блок-схема расчетно-экспериментальной методики по определению значения модуля сдвига в материале, акт о внедрении результатов работы, сертификаты поверок и паспорта измерительного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получили дальнейшее развитие методики численного расчета и экспериментальных исследований строительных конструкций из технических тканей

с покрытием, а также методики лабораторных испытаний самого материала. При этом достигнуты следующие новые научные и практические результаты:

1. Проведен всесторонний анализ современных методик и результатов лабораторных и натурных испытаний технических тканей с покрытием, а также анализ математических моделей, описывающих поведение технических тканей с покрытием под нагрузкой, работающих в составе строительных конструкций, что позволило произвести их систематизацию, выявить преимущества и недостатки и определить адекватность применения каждой модели материала при расчете строительных конструкций из технических тканей с покрытием.
2. Проведены экспериментальные и численные исследования технических тканей с покрытием с целью определения основных механических характеристик материала, необходимых для расчета строительных конструкций из технических тканей с покрытием, по результатам которых:
 - предложена новая форма образца при одноосном внеосевом растяжении;
 - разработана расчетно-экспериментальная методика по определению значения модуля сдвига в материале, которая позволяет учитывать его реальное значение при расчетах строительных конструкций из технических тканей с покрытием.
3. Разработаны методики экспериментальных и численных исследований строительной конструкции из технической ткани с покрытием в форме гиперболического параболоида при несимметричной равномерно-распределенной нагрузке, и хорошая сходимость результатов испытаний с численными данными, полученными с использованием программного комплекса ANSYS, позволила:
 - подтвердить корректность разработанной в диссертационной работе расчетно-экспериментальной методики по определению значения модуля сдвига в технических тканях с покрытием;
 - разработать рекомендации к численным расчетам строительных конструкций из технических тканей с покрытием;
 - уточнить методику расчета строительных конструкций из технических тканей с покрытием с учетом влияния модуля сдвига материала, что позволило снизить коэффициент надежности кратковременной прочности технической ткани с покрытием в среднем на 10%.
4. В связи влиянием значения модуля сдвига материала на напряженно-деформированное состояние подобных конструкций теоретически обоснована и экспериментально подтверждена необходимость учета модуля сдвига материала при расчетах строительных конструкций из технических тканей с покрытием.
5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют их использовать при создании новых видов материалов с заранее заданными свойствами, улучшении характеристик существующих материалов и при прогнозировании «остаточной» несущей способности строительных конструкций из технических тканей с покрытием, а также, при разработке новых и улучшению существующих нормативных документов по испытаниям и расчету строительных конструкций из технических тканей с покрытием.

Перспективами дальнейшей разработки темы могут являться теоретические и экспериментальные исследования по расчету длительной прочности технических тканей с покрытием, работающих в составе строительных конструкций, а также учет влияния температурных воздействий на работу материала под нагрузкой.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах.

.