

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.374.002.62

МАЛЮТИН
Евгений Викторович

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ШПАНГОУТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ АР-
МИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Минск, 2014

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом
университете

Научный руководитель

Василевич Юрий Владимирович,
доктор физико-математических наук,
профессор, Белорусский национальный
технический университет, заведующий
кафедрой сопротивления материалов
машиностроительного профиля

Официальные оппоненты:

Можаровский Валентин Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
УО «Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины», про-
фессор кафедры «Вычислительная ма-
тематика и программирование»;

Кравчук Александр Степанович,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры био- и наномеха-
ники Белорусского государственного
университета

Оппонирующая организация

ГНУ «Институт механики металлопо-
лимерных систем имени В.А. Белого
НАН Беларуси»

Защита состоится 31 января 2014 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря (8-017) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 30 декабря 2013 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
канд. физ.-мат. наук, доцент



Акимов В.А.

© Малютин Е.В., 2013

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются препреги из тканого материала, сформированные послойно на специальных оправках. Для таких препрегов в материале конструкций можно, например, прокалывать отверстия, деформировать оболочки, превращая их в торовые и другие формы, формировать шпангоуты сложного поперечного сечения, формовать оболочки путем укладки тканых заготовок на выпуклые поверхности и тому подобное.

Процесс трансформации препрегов сопровождается изменением формы и размеров заготовки, углов армирования. Поэтому необходима разработка адекватных методов расчета параметров данного процесса с целью получения требуемых характеристик изделия. Диссертация посвящена разработке методов определения параметров для изготовления шпангоутов сложной формы из конструкционных армированных материалов.

Выполненная работа является продолжением исследования препрегов, начатые учениками профессора Василевича Юрия Владимировича Сахоненко С.В. и Горелым К.А. Исследования Сахоненко С.В. посвящены решению задач о проколе отверстий в препрегах, нахождению напряженно-деформированного состояния в армирующем материале. Рассматриваются плоские задачи. Горелый К.А. разработал механико-математическую модель по расчету напряженно-деформированного состояния при изготовлении торовых оболочек; исследовал процессы, происходящие в препрегах при формировании оболочек, установил зависимость силы трения от скорости деформирования, напряжений и перемещений в нитях тканого материала. В настоящей диссертации дальнейшее развитие теории препрегов отразилось в разработке методов определения параметров для реализации в производственных условиях процесса трансформации пропитанных связующим тканых материалов при изготовлении шпангоутов сложной формы из конструкционных армированных материалов. Постановки решенных задач исходят из нужд производства изделий из полимерно-волокнистых композиционных материалов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертации соответствует Перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011 – 2015 гг., утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19.04.2010 г. № 585.

Работа выполнена в рамках задания 1.03 «Разработка аналитических и численных методов расчета на прочность и надежность технических систем машиностроения, трубопроводов, слоистых конструкционных изделий из новых полимеров с учетом физико-механических характеристик материалов, эксплуатационных условий функционирования исследуемых объектов» ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия» (2011-2015 гг.).

Цель и задачи исследования

Разработка методов определения параметров для реализации процесса трансформации пропитанных связующим тканых материалов с целью получения требуемого качества полимерных изделий. Экспериментальное подтверждение и теоретическое обоснование применения разработанных методов для изготовления шпангоутов сложного сечения и интегральных подкрепленных оболочечных конструкций, изготовленных путем укладки тканых заготовок на выпуклые поверхности оправок. В соответствии с этой целью в работе решены следующие задачи.

1. Разработан метод определения предельных деформаций неупругого сдвига ткани гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей; метод апробирован в четырехшарнирной раме путем экспериментальных испытаний тканей.

2. Выполнены теоретические исследования, подтвержденные экспериментально, по определению неупругой составляющей деформации и модуля упругости при поперечном сжатии каждого семейства нитей для тканей гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей в случае, когда концы нитей закреплены.

3. Разработана геометрическая модель вычисления неупругой деформации сдвига нитей ткани при свободном перемещении их концов, обусловленная технологиями изготовления шпангоутов и учитывающая нелинейные деформации.

4. Создана модель трансформации типовой ячейки ткани при намотке шпангоутов сложного сечения, на основании которой разработана методика определения исходных и текущих в процессе переработки геометрических параметров, в число которых включены: углы армирования, ширина тканой ленты, радиусы исходной и конечной заготовок, размеры сечений шпангоута.

5. Разработан способ укладки тканой заготовки на выпуклую поверхность оправки изготавливаемого изделия без образования складок и гофров, предусматривающий применение действия внешней нагрузки, вызывающей проектную деформацию материала.

6. Получена и решена нелинейная система дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка, описывающая процесс укладки квадратного образца ткани на сферическую поверхность.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – ткани гладкого переплетения и мультиаксиальные ткани, пропитанные полимером, в условиях их трансформации в шпангоуты сложной формы. Предмет исследования – методы определения параметров для изготовления шпангоутов сложной формы из конструкционных армированных материалов.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Геометрическая модель, описывающая трансформацию типовой ячейки ткани при намотке шпангоутов сложного сечения, являющаяся основой оп-

ределения параметров намотки с учетом заданных начальной и конечной форм изделия, физико-механических свойств пропитанных тканей связующим, особенностей структуры строения тканей из многоволоконных нитей, вязкости связующего. Модель основана на результатах исследования поперечного сжатия армирующих элементов ткани. На основе модели определены модуль Юнга и неупругая составляющая деформации поперечного сжатия каждого семейства нитей исследованных тканых материалов.

2. Методы определения неупругих деформаций сдвига для тканей ортогонального армирования и неортогональных биаксиальных симметричных тканей, модуля Юнга, величины натяжения тканой ленты при ее намотке, геометрических параметров для изготовления шпангоутов сложной формы из конструкционных армированных материалов (углы армирования, ширина тканой ленты, радиусы исходной и конечной заготовок, размеры сечения шпангоута). Это позволило выдать рекомендации производству для практической реализации предложенных методов определения параметров при изготовлении шпангоутов сложного сечения.

3. Формулы для расчета неупругой составляющей деформации поперечного сжатия нитей ткани в условиях отсутствия в них растягивающих напряжений. Оценка предельного значения такой трансформации с помощью экспериментальных исследований, не представляется возможной в настоящее время. Решение возникшей проблемы найдено и реализовано при помощи геометрического подхода.

4. Дифференциальные уравнения, описывающие трансформацию тканой ленты при намотке шпангоутов сложного поперечного сечения. На основании уравнений установлена зависимость между определяющими геометрическими параметрами (углами армирования и шириной тканой ленты, размерами и углами шпангоута, радиусами исходной и конечной заготовок), относящимися к начальному и конечному состояниям изготавливаемого изделия. Найдено условие устойчивости нитей вследствие перехода геодезической намотки в негеодезическую. Параметры использованы в технологии производства шпангоутов сложного сечения.

5. Способ укладки тканой заготовки на выпуклую поверхность оправки изготавливаемого изделия без образования складок и гофр, предусматривающий применение целенаправленного действия внешней нагрузки, вызывающей проектную деформацию материала. Для тканей гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей способ реализован при приложении к концам нитей соответствующих растягивающих усилий.

6. Нелинейная система дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка, описывающая процесс укладки образца ткани на выпуклую поверхность оправки, и ее решение для квадратного образца ткани, уложенного на поверхность сферы.

Личный вклад соискателя

Теоретические и экспериментальные исследования, обобщенные в представленной работе, выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторст-

ве. Основные положения, выводы и рекомендации, принадлежат автору. Научное направление, цель, задачи и методология исследований совместно разработаны с научным руководителем профессором Василевичем Ю.В. Другие соавторы совместных публикаций оказывали помощь при обсуждении методик проведения экспериментальных исследований, анализе и проверке полученных результатов.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: на XXIX Российской школе, посвященной 85-летию со дня рождения академика В.П. Макеева, г. Миасс, 2009 г.; 29, 30, и 31 международных научно-практических конференциях «Композиционные материалы в промышленности (Славполиком)», Ялта, 2009, 2010, 2011 г.г.; XIX Международной научно-технической конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», г. Обнинск, 2010 г.; V Международной конференции «Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология», г. Саратов, 2010 г., V Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика-2011», г. Минск, 2011 г.; Республиканском научно-методическом семинаре по теоретической и прикладной механике, г. Минск, февраль, 2011-2013 г.г.; Международной научной конференции «XI Белорусская математическая конференция», г. Минск, 2012 г.; Международной научной конференции «Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до –наноразмерных структур – 2013», г. Минск, БГУ, 2013 г.; Международной научной конференции «Полимерные композиты и трибология», г. Гомель, 2013 г.

Опубликованность результатов диссертации

Основные положения диссертации опубликованы в 26 работах, в том числе в 9 статьях в научных журналах согласно перечню ВАК Республики Беларусь (3,5 авторских листов), в 2 статьях в научных журналах, 13 статьях в материалах конференций и двух патентах на изобретение. Общий объем публикаций по теме диссертации составил 12,5 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Объем рукописи диссертации составляет 129 страниц основного текста, 48 рисунков, 8 таблиц, библиографический список из 142 наименований, включая 26 публикаций соискателя, и занимает 11 страниц. Диссертация включает приложение на 8 страницах, отражающее внедрение результатов в производство шпангоутов и учебный процесс.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан анализ методов изготовления элементов силового набора из композиционных материалов и технологий формования шпангоутов сложного поперечного сечения.

Деформируемость тканей в направлениях, отличных от направлений армирования, может быть существенно больше. На этом свойстве основаны технологические процессы намотки и выкладки с использованием косоугольного армирования тканей под углом $\mp\varphi$, или полученных раскроем под углом φ из ортогональных тканей.

Примером использования таких тканей является изготовление шпангоутов сложного сечения. Суть способа изготовления шпангоута заключается в следующем. Нетканая лента, либо плоская лента диагонального плетения или лента типа «сплюснутый оплеточный рукав» наматываются на оправку с кольцевой канавкой или кольцевым выступом по форме наружного профиля меридионального сечения шпангоута. Форма шпангоута может быть разнообразной. Самая простая конфигурация сечения шпангоута, получаемого рассматриваемым способом, представляет собой ∇ -образный профиль. Сечение оправки при получении такого профиля представлено на рисунке 1.

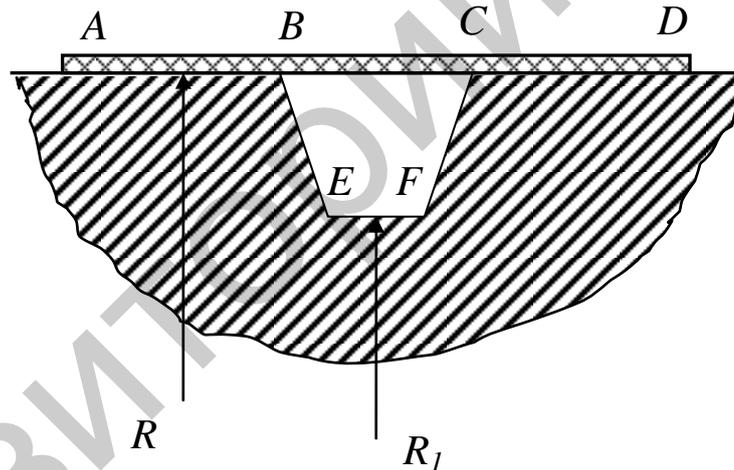


Рисунок 1 – Сечение оправки

Здесь R и R_1 - радиусы оправки и кольцевой канавки; $R > R_1$; $ABCD$ - намотанный слой ткани; $BEFC$ - кольцевая канавка.

Параллельно с намоткой ткани осуществляется намотка кольцевых нитей, утягивающих ткань. В результате она занимает положение ∇ -образной заготовки. Такая трансформация ткани должна сопровождаться ее деформацией. Чтобы ткань в результате деформации не образовывала складок, необходимо, чтобы типичная ячейка ткани деформировалась следующим образом (см. рисунок 2). Если диагональ AC на оправке расположена вдоль окружности, то при деформации она уменьшается, а диагональ DB - увеличивается. Происходит поворот одного семейства нитей относительно второго.

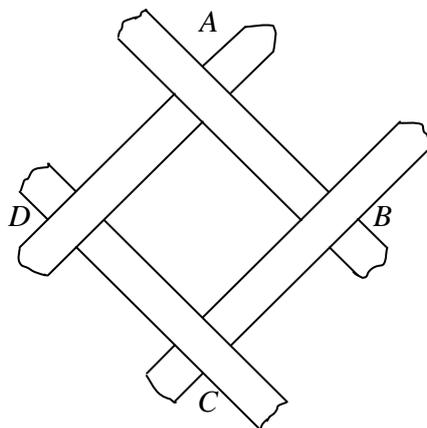


Рисунок 2 – Типичная ячейка ткани

На рисунке нити DA и CB - нити основы, а AB и DC - нити утка.

В процессе трансформации заготовки происходят изменения ее линейных размеров и углов армирования. На рисунке 3 показана фотография фрагментов модельных шпангоутов различного исполнения лентой, выкроенной из ортогональной ткани под углом 45° .

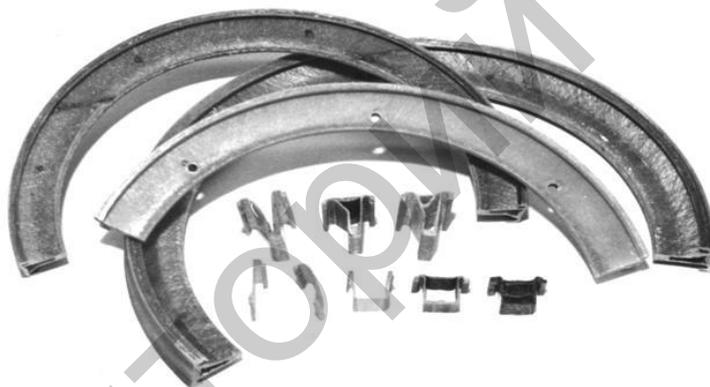


Рисунок 3 – Фрагменты шпангоутов различного поперечного сечения из нетканой ленты

Для установки возможности укладки косоугольно армированных тканей в кольцевую канавку необходимо знать в первую очередь максимальную деформируемость тканей. Рассмотрению этих вопросов посвящены исследования, содержащиеся во **второй** главе.

Глава 2 содержит теоретические и экспериментальные исследования по изучению поперечного сжатия нитей в результате поворота одного семейства нитей относительно второго с учетом возникающих растяжений в нитях.

Рассматривается задача об установлении неупругой составляющей деформации сжатия ткани, которое осуществляется в ее плоскости. Отметим, что ввиду абсолютной гибкости нитей сжатие в обычном смысле в направлении нитей невозможно, так как оно приводит к потере устойчивости каркаса ткани. Существует и другой вид сжатия. Силы, осуществляющие такое сжатие, лежат в касательной плоскости к ткани и направлены поперек нитей. Примером является сжатие, которое происходит при параллельном сдвиге нитей одного семейства относительно второго. Другой вид такого сжатия происходит при поворо-

те семейств относительно друг друга.

При поперечном сжатии происходят геометрические изменения параметров сечения нитей. Второй этап сжатия характеризуется только упругими деформациями. На этом основании можно руководствоваться линейной зависимостью между общей деформацией ΔW и растягивающей тканью нагрузкой P в области упругой деформации

$$\Delta W = \kappa + \kappa_1 P, \quad (1)$$

где κ и κ_1 - некоторые постоянные, причем κ описывает деформацию при неупругом сжатии ткани, а κ_1 – при упругом.

Геометрическая интерпретация формулы (1) в виде прямой CB представлена на рисунке 4

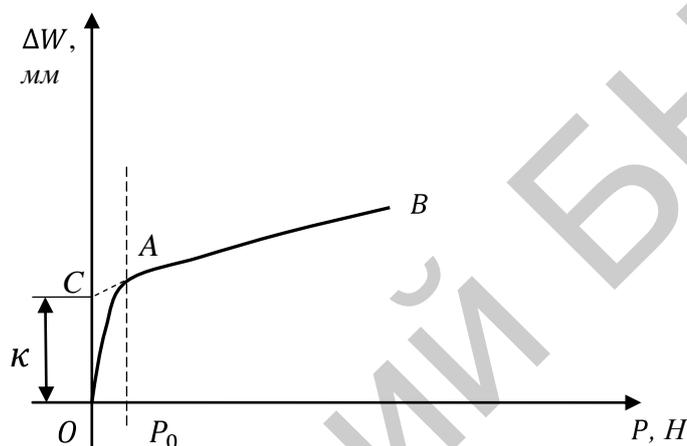


Рисунок 4 – Зависимость деформативности ткани от нагрузки

Более подробно кривая деформирования представлена на рисунке 5, где показаны результаты экспериментальных исследований неупругого и упругого поворотов нитей семейств в рамных устройствах. Такие деформации приводят к поперечному сжатию семейств нитей.

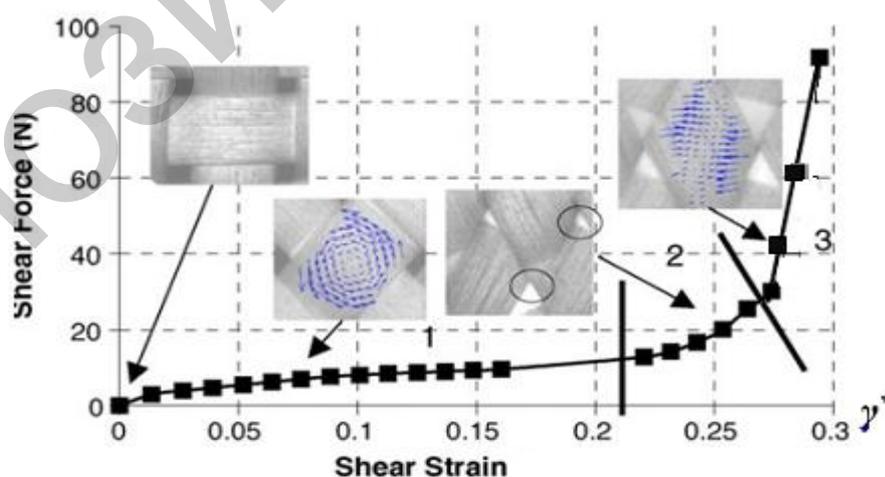


Рисунок 5 - Кривая деформирования

Типичная кривая деформирования при сдвиге рамы состоит из 3-х зон, рисунок 5. В начале первой зоны нити основы и утка в месте контакта начинают поворачиваться друг относительно друга при весьма малой нагрузке. Глобальный сдвиг ткани происходит при смещении нитей, когда силы трения не

способны обеспечить равновесие. Начало зоны 2 соответствуют углу сдвига γ^* , при котором нити начинают входить в контакт с соседними и сжиматься в поперечном направлении. Этот угол можно рассматривать как предельный для целей трансформации. Начало зоны 3 характеризует полное смыкание нитей и соответственно, резкое увеличение усилия сдвига и сдвиговой жесткости за счет сдавливания нитей. На практике в этой зоне в образце могут образовываться складки от потери устойчивости ткани.

Для исследования процессов, происходящих при поперечном сжатии препрегов, проводились испытания плоских образцов, изготовленных из тканого материала. Если в четырехзвеннике (см. рисунок 6) защемлены концы нитей ткани, то их поперечное сжатие осуществляется следующим образом. Происходит параллельный сдвиг нитей, при этом уменьшается расстояние между ними. Изменяются геометрические параметры сечения нитей за счет доуплотнения. Эти изменения происходят при небольшой по величине нагрузке. Дальнейшее поперечное сжатие характеризуется упругими деформациями.



Рисунок 6 - Фотография образца ткани в момент нагружения

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что непараллельность семейств нитей линии закрепления образца ткани менее 2° не влияет на результаты испытаний, а границу закрепления образца ткани в четырехзвеннике необходимо совмещать с линиями расположения центров шарниров.

Если при переработке препрегов достигнуты условия, при которых имеет место упругое сжатие, то в предельном случае это может привести к потере устойчивости армирующего материала (образование гофр и других дефектов). На этом основании переработка препрегов должна осуществляться с учетом неупругих деформаций. Отсюда вытекает необходимость знания максимального значения неупругих деформаций для каждого семейства нитей.

Пусть вырезан квадратный образец со стороной a , у которого стороны параллельны соответствующим семействам нитей. При испытаниях фиксируется усилие P , приложенное к рамке четырехзвенника и перемещение ΔW , которое равносильно изменению длины диагонали образца.

Результаты испытаний для ткани Т-13 представлены в таблице 1. Здесь в таблице в каждой группе из трех строк, выделенных горизонтальными прямыми

ми, первая строка данных относится к случаю, когда в приспособлении заземлены нити основы, вторая строка данных – заземлены нити утка, третья строка – все концы нитей заземлены в четырехзвеннике.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов ткани Т-13 на поперечное сжатие

	P_i, H												
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	100	150	250
ΔW_{ij} , мм	23	50	63	65	71	74	74	75	75	75	80	81	83
	34	58	73	77	82	83	87	88	89	90	94	95	97
	25	54	60	64	67	70	71	73	74	74	81	83	86
	26	55	68	76	79	80	82	84	85	85	90	91	92
	29	65	74	83	84	88	90	90	93	93	96	96	97
	31	61	63	68	70	73	74	75	76	77	82	85	87
	28	56	70	73	76	79	81	81	81	82	87	89	90
	31	66	78	82	86	88	90	90	91	91	96	97	98
	30	55	60	62	66	67	69	72	76	77	84	89	92
	27	55	62	72	75	76	78	79	80	80	85	88	90
	30	73	76	79	84	85	90	90	91	91	95	95	98
	29	60	66	70	73	74	77	77	78	79	85	88	90
	26	50	61	65	66	68	71	72	73	73	79	82	84
	30	63	77	82	85	87	88	89	90	91	95	97	98
	30	54	64	67	73	75	78	78	81	81	90	94	97
	26	58	65	73	86	88	89	89	90	90	94	95	96
	29	64	70	70	84	86	86	88	89	92	94	96	96
	26	50	64	70	73	75	76	78	78	79	80	81	85
	27	59	71	76	79	81	82	83	84	85	89	90	91
	28	66	69	75	83	84	86	87	88	90	92	97	98
	28	54	63	65	69	70	73	74	76	79	82	86	87
	24	54	66	68	70	72	73	76	77	80	82	86	87
	28	55	65	69	71	72	74	75	77	78	85	88	94
	29	58	59	59	60	61	65	70	75	80	83	86	88
	28	52	58	59	60	60	61	61	62	63	71	75	80
	30	58	70	76	80	81	84	85	86	87	92	94	95
	31	65	68	70	72	74	76	77	78	79	84	92	95
	25	52	64	70	78	80	81	83	83	84	85	85	86
	30	61	77	79	81	80	84	85	86	88	90	92	94
	29	55	65	71	73	76	78	80	80	81	86	91	92

Используя данные таблицы 1 из зависимости (1) с применением метода наименьших квадратов получена система уравнений для нахождения k и k_1

$$\begin{aligned}
 m \cdot n \cdot k + \left(n \cdot \sum_{i=1}^m P_i \right) k_1 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta W_{ij}, \\
 \left(n \cdot \sum_{i=1}^m P_i \right) k + \left(n \cdot \sum_{i=1}^m P_i^2 \right) k_1 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_i \Delta W_{ij}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где m – количество испытаний образца ткани; n – количество образцов.

По результатам испытаний найдены:

в случае защемления нитей основы

$$\kappa = 63,8 \text{ мм}; \quad \kappa_1 = 1,39 \text{ мм/Н}; \quad (3)$$

в случае защемления нитей утка

$$\kappa = 71,6 \text{ мм}; \quad \kappa_1 = 1,4 \text{ мм/Н}; \quad (4)$$

в случае защемления нитей основы и утка

$$\kappa = 62,4 \text{ мм}; \quad \kappa_1 = 1,55 \text{ мм/Н}. \quad (5)$$

Защемление нитей только одного семейства позволяет найти неупругую и упругую составляющие при сжатии этого семейства, так как второе в этом случае при нагружении находится все время на первой стадии неупругих деформаций. Такое положение дало возможность определить относительную неупругую составляющую ε_1 и модуль упругости сжатия семейства нитей

$$\varepsilon_1 = \frac{\kappa^2}{a^2}, \quad E_{\text{сж}} = \frac{a}{\kappa \kappa_1 h \left(\sqrt{2} + \frac{\kappa}{a} \right)}. \quad (6)$$

Здесь величины κ и κ_1 берутся для случая, когда нити основы защемлены, если по формулам (6) определяются ε_1 и $E_{\text{сж}}$ для нитей основы; для нитей утка выбор величин κ и κ_1 осуществляется аналогичным образом; h - толщина ткани; a - размер стороны квадратного образца ткани.

Глава 3 посвящена установлению величины неупругой составляющей ткани при сжатии при отсутствии в нитях растягивающих напряжений. Дело в том, что если у нитей семейства концы нитей не закреплены, то они при деформации могут перемещаться. При поперечном сжатии такое перемещение позволяет увеличить долю неупругого сжатия. Оценка предельного значения такой трансформации может быть осуществлена только с применением результатов теоретических исследований. Геометрический подход к вычислению деформаций существенно упростил вывод основных соотношений для определения предельных деформаций поперечного сжатия ткани. Такой прием предполагает выделение типичной ячейки ткани до и после деформации (рисунок 7).

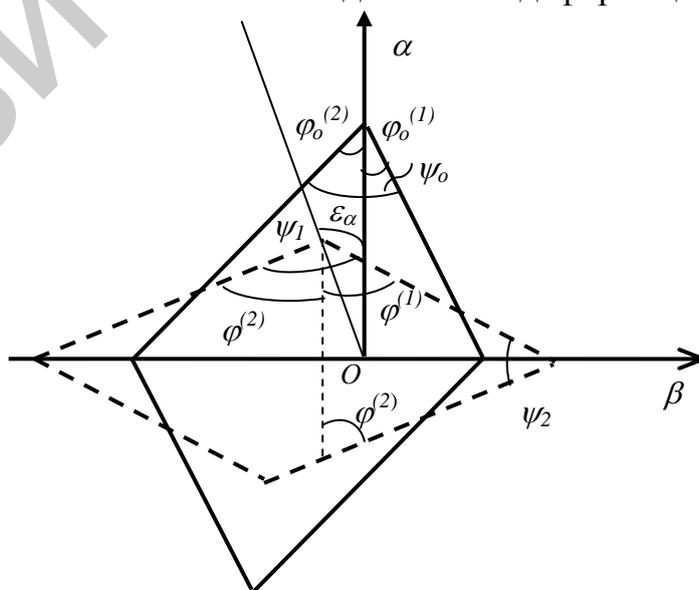


Рисунок 7 – Типичная ячейка ткани до (-) и после (---) деформации

Здесь $\varphi_0^{(1)}$ и $\varphi_0^{(2)}$ – углы армирования нитей семейств в исходном состоянии; $\varphi^{(1)}$ и $\varphi^{(2)}$ – углы армирования семейств нитей после деформации; $\varepsilon_{\alpha\beta}$ - деформация сдвига в осях α , β .

Для ортогональной ткани, для которой

$$\varphi_0^{(1)} + \varphi_0^{(2)} = \pi/2,$$

получена система разрешающих уравнений

$$\begin{aligned} \sin \varepsilon_{\alpha\beta} &= \operatorname{ctg} 2\varphi_0^{(1)} \frac{(1 + \varepsilon_\beta)^2 - (1 + \varepsilon_\alpha)^2}{2(1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta)}, \\ (1 + \varepsilon_\alpha)^2 + (1 + \varepsilon_\beta)^2 &= 2, \\ \sin \varepsilon_{12}^{(1)} &= \frac{(1 + \varepsilon_\beta)^2 - (1 + \varepsilon_\alpha)^2}{2\sin 2\varphi_0^{(1)}} = -\sin \varepsilon_{12}^{(2)}, \\ \varepsilon_{21}^{(1)} &= \varepsilon_{21}^{(2)} = \cos \varepsilon_{12} - 1, \\ \varepsilon_{12}^{(1)} &= -\varepsilon_{12}^{(2)} = \varepsilon_{12}, \end{aligned} \quad (7)$$

где деформации нитей $\varepsilon_1^{(1)}$ и $\varepsilon_1^{(2)}$ с учетом гипотезы о нерастяжимости нитей предполагаются равными нулю; ε_α и ε_β – деформации координатных линий α и β ; $\varepsilon_{12}^{(1)}$, $\varepsilon_{21}^{(1)}$, $\varepsilon_{12}^{(2)}$ и $\varepsilon_{21}^{(2)}$ – деформации в перпендикулярном направлении к нитям; ε_{12} – деформация сдвига семейств нитей.

На основании решения уравнений системы (7) получены диапазоны изменения деформаций ячейки вдоль координатных линий α и β

$$\left(1 + \sin 2\varphi_0^{(1)}\right)^{1/2} - 1 \geq \varepsilon_\alpha \geq \left(1 - \sin 2\varphi_0^{(1)}\right)^{1/2} - 1. \quad (8)$$

$$\left(1 - \sin 2\varphi_0^{(1)}\right)^{1/2} - 1 \leq \varepsilon_\beta \leq \left(1 + \sin 2\varphi_0^{(1)}\right)^{1/2} - 1.$$

На рисунке 8 представлена диаграмма предельно возможных сочетаний деформаций ε_α и ε_β в зависимости от величины угла $\varphi_0^{(1)}$. Максимальный диапазон изменения деформаций соответствует углу $\varphi_0^{(1)} = 45^\circ$, при этом теоретические деформации растяжения могут достигать 41,4%, а поперечного сжатия - 100%. В этом плане данный угол является оптимальным.

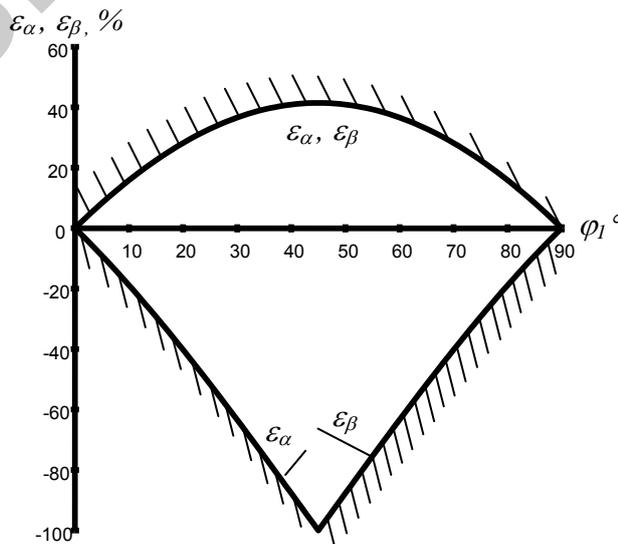


Рисунок 8 – Диаграмма предельных деформаций $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$

В главе 4 рассматривается использование свойств неупругого деформирования тканей при трансформации в конечное изделие - шпангоуты. Приме-

ром использования косоугольно армированных тканей является изготовление шпангоутов ∇ -образного и двутаврового профилей. Этапы изготовления таких шпангоутов показаны на рисунке 9.

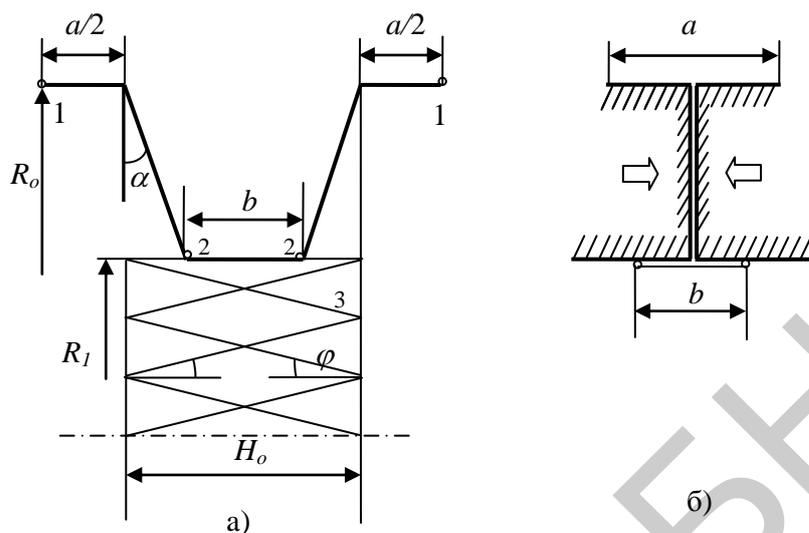


Рисунок 9 – Этапы изготовления шпангоутов:

- а) формообразование ∇ -образной заготовки (1 - кромочные нити; 2 - кольцевые нити, утягивающие тканую ленту; 3 - спиральные нити);
- б) формообразование шпангоута двутаврового профиля

В исходном состоянии угол армирования тканой ленты $\varphi = \mp \varphi_0$. В процессе намотки происходят изменения ее линейных размеров и углов армирования. При этом при трансформации типовая ячейка тканой ленты ведет себя так, что одна ее диагональ в процессе деформации все время лежит на направляющей окружности, а вторая диагональ параллельна образующей поверхности шпангоута.

Учитывая, что проектируемый шпангоут является оболочкой вращения вокруг оси Oz , введем систему ортогональных криволинейных координат в виде меридианов и параллелей. Тогда деформирование типовой ячейки $ABDC$ тканой ленты можно проиллюстрировать согласно схеме, приведенной на рисунке 10.

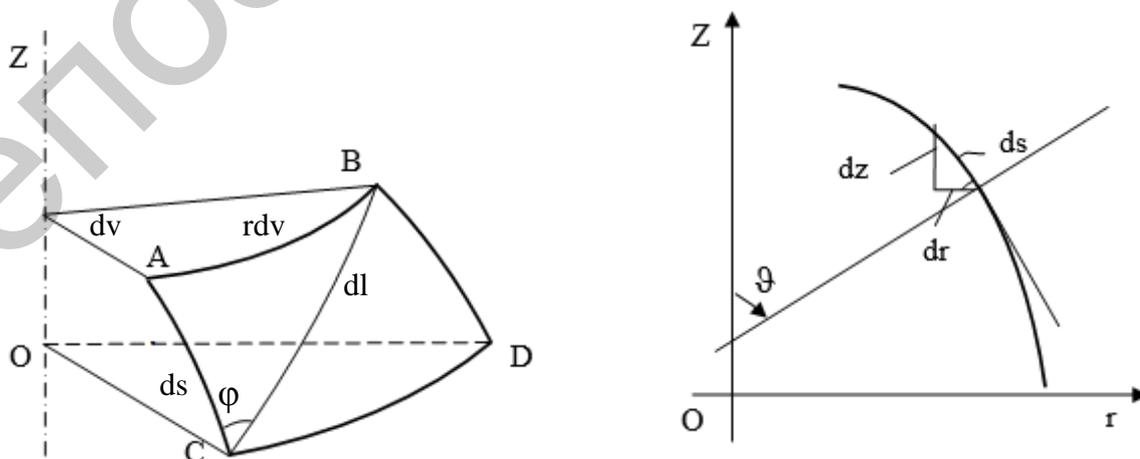


Рисунок 10 – Расчетная схема деформирования типовой ячейки ткани

Здесь AB – дуга направляющей окружности, а AC – дуга образующей поверхности шпангоута; AB и AC составляют между собой прямой угол; dl – длина дуги. На правом рисунке изображено сечение ячейки вертикальной плоскостью.

На основании рисунка имеем соотношения

$$\frac{rdv}{dl} = \sin \varphi; \quad \frac{ds}{dl} = \cos \varphi; \quad \frac{dz}{ds} = \sin \vartheta; \quad \frac{dr}{ds} = -\cos \vartheta;$$

(9)

$$\frac{r^* dv^*}{dl^*} = \sin \varphi^*; \quad \frac{ds^*}{dl^*} = \cos \varphi^*; \quad \frac{dz^*}{ds^*} = \sin \vartheta^*; \quad \frac{dr^*}{ds^*} = -\cos \vartheta^*.$$

Величины с индексом « * » характеризуют конечное деформированное состояние ячейки; без индекса – исходное состояние.

Формулы (9) положены в основу определения углов армирования, ширины тканой ленты, радиусов исходной и конечной заготовок, размеров сечения шпангоута, величины натяжения тканой ленты при ее намотке, которые являются определяющими параметрами при изготовлении шпангоутов. Практическое использование тканой ленты при изготовлении шпангоутов допустимо, если ее деформация не превосходит предельной деформации при поперечном сжатии ткани.

На рисунках 11 и 12 представлены фотографии оболочечных конструкций, имеющих шпангоуты различного исполнения с использованием предложенной технологии их изготовления.



Рисунок 11 – Силовая оболочка со встроенными шпангоутами



Рисунок 12 – Силовая оболочка с корбчатými шпангоутами

Имеются случаи, когда формование шпангоутов методом намотки невозможно. Например, когда они имеют элементы с выпуклыми поверхностями в виде сферы. В этих случаях формование изделий можно осуществить только вручную путем послойной укладки тканых заготовок на поверхность оправки. Основное требование к такой операции состоит в том, чтобы заготовка лежала на выпуклой поверхности оправки без складок и соприкасалась с ней всеми точками в зоне контакта. Для тканей гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей это достигается приложением к концам каждой нити соответствующих растягивающих усилий.

Схема деформирования заготовки ткани, укладываемой на поверхность сферы, показана на рисунке 13.

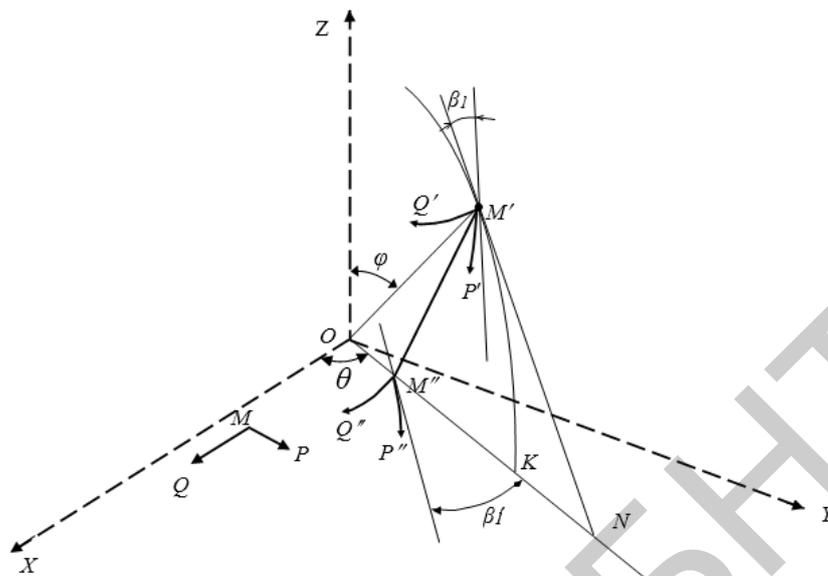


Рисунок 13 – Схема расположения точек заготовки ткани на поверхности сферы

Для сферической поверхности получены дифференциальные уравнения в перемещениях нитей ткани, обеспечивающие требуемые условия укладки образцов ткани на поверхность сферы

$$\begin{aligned} \frac{\partial s'_{11}}{\partial \theta} \cos \beta_1 &= \frac{2R^2}{R^2 + r_1^2} \cdot \frac{\partial r_1}{\partial \theta}, \\ -\frac{\partial s'_{11}}{\partial \theta} \sin \beta_1 &= \frac{2R^2}{R^2 + r_1^2} \cdot r_1, \quad \frac{\partial s''_{11}}{\partial \theta} \cos \beta_1 = \frac{\partial r_1}{\partial \theta}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s'_{12}}{\partial \theta} \sin \beta_1 &= \frac{2R^2}{R^2 + r_1^2} \cdot \frac{\partial r_1}{\partial \theta}, \\ -\frac{\partial s'_{12}}{\partial \theta} \cos \beta_1 &= \frac{2R^2}{R^2 + r_1^2} \cdot r_1, \quad \frac{\partial s''_{12}}{\partial \theta} \sin \beta_1 = \frac{\partial r_1}{\partial \theta}. \end{aligned}$$

Здесь $s''_{12} = Q''M''$ и $s''_{11} = P''M''$ - дуги кривых, рассматриваемые на плоскости как результат промежуточного деформирования образца ткани; точки M' и M'' связаны соотношением $M'N = M''N$; $s'_{12} = Q'M'$, $s'_{11} = P'M'$ - дуги соответствующих кривых линий, расположенных на поверхности сферы; R - радиус сферы; $r_1 = OM''$ и β_1 - цилиндрические координаты точки M'' , расположенной на плоскости Oxy .

Уравнения (10) получены путем проектирования соответствующих дуг s'_{11} , s'_{12} , s''_{11} , s''_{12} на параллели и меридианы. Они выражают связь между перемещениями точек M' и M'' .

Уравнения (10) представляют собой полную систему для решения задач по укладке ткани на выпуклые сферические поверхности. В качестве граничных условий отождествляется задание перемещения концов нитей под действием соответствующей нагрузки.

Так, для сферической поверхности и квадратного образца ткани со стороной a получено решение в виде

$$r_1 = f(x_1) \exp \left(\int_0^{\theta} \operatorname{ctg} \beta_1 d\theta \right), \quad (11)$$

где

$$\beta_1 = m_1 \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right)^{n_1}, \quad m_1 = (0,5\pi)^{1-n_1}, \quad (12)$$

n_1 – некоторая постоянная, определяемая из граничных условий.

Неизвестная функция $f(x_1)$ находится путем решения интегрального уравнения

$$\int_0^{\theta} \frac{r_1 d\theta}{(R^2 + r_1^2) \sin \beta_1} = \frac{0,25}{R^2} (1 + \gamma_{11}) a. \quad (13)$$

где γ_{11} – неупругая составляющая растяжения ткани.

Найденное теоретическое решение (11) адекватно практическим результатам, полученным при укладке ткани на сферическую поверхность путем натяжения концов бечевки под углом

$$\beta_0 = m_1 (0,25\pi)^{n_1} > 0,5 \alpha_0$$

с диагональю образца, где α_0 – минимально возможный угол между нитями семейств при неупругих деформациях.

Расчеты выполнены для ткани Т-13 размером 196x196 мм². Укладка осуществлялась на оправку, поверхность которой представляет собой сферу диаметром 196 мм, состыкованную с конической поверхностью. Заготовка ткани, уложенная на поверхность согласно расчетной схеме, демонстрируется на фотографии (рисунок 14).

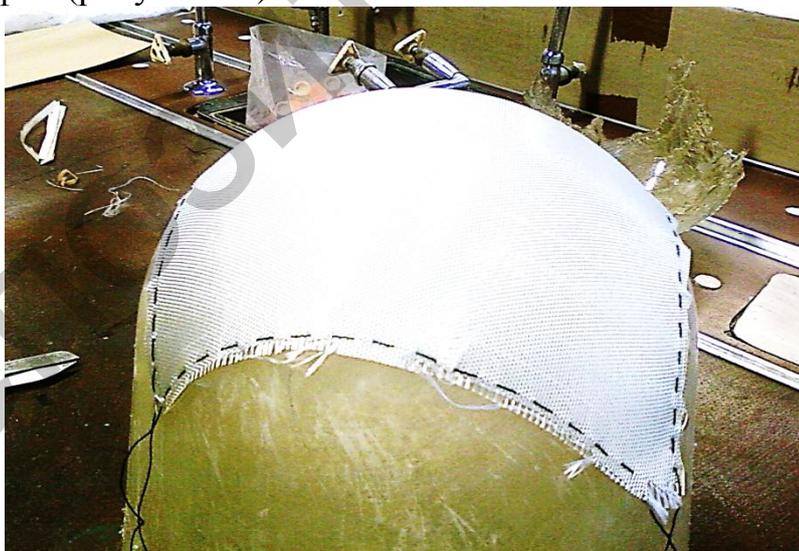


Рисунок 14 – Положение образца ткани на поверхности сферы

Здесь на рисунке черная нить представляет собой бечевку, с помощью которой уложен образец ткани на сферическую поверхность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана геометрическая модель, описывающая трансформацию типовой ячейки ткани при намотке шпангоутов сложного сечения, являющаяся основой определения параметров намотки с учетом заданных начальной и конечной форм изделия, физико-механических свойств пропитанных тканей связующим, особенностей структуры строения тканей из многоволоконных нитей, вязкости связующего. Модель основана на результатах исследования поперечного сжатия армирующих элементов ткани. На основе модели определены модуль Юнга и неупругая составляющая деформации поперечного сжатия каждого семейства нитей исследованных тканых материалов [2, 3, 5, 24, 11, 12, 18, 26].

2. Разработаны методы определения неупругих деформаций сдвига для тканей ортогонального армирования и неортогональных биаксиальных симметричных тканей, модуля Юнга, величины натяжения тканой ленты при ее намотке, геометрических параметров для изготовления шпангоутов сложной формы из конструкционных армированных материалов (углы армирования, ширина тканой ленты, радиусы исходной и конечной заготовок, размеры сечения шпангоута). Это позволило выдать рекомендации производству для практической реализации предложенных методов определения параметров при изготовлении шпангоутов сложного сечения [4, 8, 13, 16, 17, 19, 23, 25].

3. Получены формулы для расчета неупругой составляющей деформации поперечного сжатия нитей ткани в условиях отсутствия в них растягивающих напряжений. Оценка предельного значения такой трансформации с помощью экспериментальных исследований, не представляется возможной в настоящее время. Решение возникшей проблемы найдено и реализовано при помощи геометрического подхода [1].

4. Впервые получены дифференциальные уравнения, описывающие трансформацию тканой ленты при намотке шпангоутов сложного поперечного сечения. На основании уравнений установлена зависимость между определяющими геометрическими параметрами (углами армирования и шириной тканой ленты, размерами и углами шпангоута, радиусами исходной и конечной заготовок), относящимися к начальному и конечному состояниям изготавливаемого изделия. Найдено условие устойчивости нитей вследствие перехода геодезической намотки в негеодезическую. Параметры использованы в технологии производства шпангоутов сложного сечения [1, 7].

5. Найден способ укладки тканой заготовки на выпуклую поверхность оправки изготавливаемого изделия без образования складок и гофр, предусматривающий применение целенаправленного действия внешней нагрузки, вызывающей проектную деформацию материала. Для тканей гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей способ реализован при приложении к концам нитей соответствующих растягивающих усилий [10, 14, 15, 20, 21, 22, 9].

6. Впервые получена нелинейная система дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка, описывающая процесс укладки образца ткани на выпуклую поверхность оправки и решена для квадратного образца ткани, уложенного на поверхность сферы [6, 7, 10, 14, 15, 20, 21, 22, 9].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Диссертационная работа посвящена научным исследованиям по разработке, проектированию и изготовлению шпангоутов сложного поперечного сечения. Потребность в исследованиях продиктована производственной необходимостью при изготовлении таких изделий. Многие конструкции без такого силового набора не могут функционировать. Для практического использования полученных научных результатов выполнены теоретические и экспериментальные исследования, на основе которых выработаны и апробированы рекомендации по проектированию и созданию шпангоутов сложной конструкции, включающие создание механико-математической модели, описывающей трансформацию элементарной ячейки ткани при намотке шпангоутов. Показана роль влияния заданных параметров намотки с учетом начальной и конечной форм изделия, физико-механических свойств пропитанных связующим тканей, особенности строения тканей из многоволоконных нитей, вязкости связующего на строгое соблюдение технологического процесса, прочностных и деформационных характеристик изготавливаемых шпангоутов. Впервые разработаны методы определения модуля Юнга препрега и неупругой составляющей деформации поперечного сжатия каждого семейства нитей. Указанные характеристики являются важнейшими параметрами при расчете шпангоутов на прочность, жесткость и устойчивость и являются основой для исследования прочностных и деформационных характеристик в создаваемых новых инженерно-технических изделиях.

Результаты проведенных исследований уже нашли применение в производственной практике изготовления изделий из полимерных материалов, что отражено в двух актах внедрения патентов и двух актах внедрения в технологический процесс рекомендаций, выработанных на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендованный ВАК

1. Модель деформирования конструкционных тканей / А.Б. Миткевич, А.А. Кульков, К.А. Горелый, Е.В. Малютин // Вопросы оборонной техники. Серия 15. – 2010. – Вып. 1(156) – 2(157). – С. 3 – 10.
2. Функциональные зависимости для сил внутреннего трения при деформации препрегов/ Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 3(16). – С. 31– 33.
3. Теоретические и экспериментальные исследования по определению неупругой составляющей сжатия ткани Т-13 / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 4(17). – С. 63 – 65.
4. Определение характеристик препрегов при сжатии / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 2 (19). – С. 53 – 57.

5. Установление закономерностей поведения тканей при сжатии / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 1(22). – С. 166 – 170.

6. Использование свойств тканых материалов при укладке их на выпуклые поверхности / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 2(23). – С. 52–57 .

7. Использование свойств косоугольно армированных тканей при намотке шпангоутов / К.А. Горелый, Е.В. Малютин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 2(23). – С. 69–73 .

8. Способы и структурная организация тканых материалов при создании композиционных материалов / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин, Е.Ю. Неумержицкая // Теоретическая и прикладная механика. Международный научно-технический сборник. – 2013. – Выпуск 28. – С. 66 – 68.

9. Применение свойств препрегов при формировании оболочек на гибких оправках / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин, Е.Ю. Неумержицкая // Теоретическая и прикладная механика. Международный научно-технический сборник. – 2013. – Выпуск 28. – С. 328 – 331.

Статьи в сборниках материалов научных конференций и тезисы докладов

10. Зависимость между деформационными характеристиками тканей гладкого переплетения / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Композиционные материалы в промышленности: сб. науч. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф. – Ялта, 2009. – С. 84 – 89.

11. Коэффициенты внутреннего трения у препрегов, армированных тканями гладкого переплетения / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Композиционные материалы в промышленности: сб. науч. тр. XXX Междунар. науч.-техн. конф. – Ялта, 2010. – С.110 – 113.

12. Трение в препрегах / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология: сб. науч. тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. – Саратов, 2010. – С. 54 – 58.

13. Неупругая составляющая сжатия ткани / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Проблемы новых композиционных материалов: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Обнинск, 2010. – С. 48 – 52.

14. Разработка технологического приема укладки квадратного образца ткани на сферическую поверхность / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Композиционные материалы в промышленности: сб. науч. тр. XXX Междунар. науч.-техн. конф. – Ялта, 2011. – С.91 – 96.

15. Использование неупругих свойств тканей при трансформации тканой заготовки в конечное изделие / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Механика–2011: сб. науч. тр. 5-го Международ. конгр. по теор. и прикл. механике. – Минск, 2011. – С. 472 – 476.

16. Прочностные и деформационные характеристики конструкционных изделий, изготовленных из гетерогенных полимерных материалов / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Международная научная конференция «XI Белорусская математическая конференция». Тезисы докладов. – Минск, 2012. – С. 59.

17. Структурная организация тканых наполнителей для композиционных материалов и ее влияние на анизотропию свойств / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Международная научная конференция «XI Белорусская математическая конференция». Тезисы докладов. – Минск, 2012. – С. 60.

18. Методические аспекты исследования термомеханических свойств материалов / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин // Материалы международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении – 2012». – Минск, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, 2012. – С. 17 – 19.

19. Решение научно-технических проблем при формовании оболочек на гибких оправках / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин, Е.Ю. Неумержицкая // XLIV Международный научно-методический семинар-коллоквиум «Моделирование и компьютеринг в механических и мехатронных системах». Тезисы докладов. – Минск, февраль 2013. – С. 43.

20. Разработка и изготовление шпангоутов и других изделий силового набора из композиционных материалов / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин, Е.Ю. Неумержицкая // Международная научная конференция «Теории оболочек и мембран в механике и биологии: от макро- до наноразмерных структур–2013». – Минск, БГУ, сентябрь 2013. – С. 16 – 20.

21. Использование свойств препрегов в технологическом процессе изготовления оболочек из композиционных материалов / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин, Е.Ю. Неумержицкая // Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб–2013). – Гомель, июнь 2013. – С. 24 – 27.

22. Методы изготовления элементов силового набора из композиционных материалов / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин, Е.Ю. Неумержицкая // Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб–2013). – Гомель, июнь 2013. – С. 24 – 27.

Статьи в других научных изданиях

23. Зависимости между поперечными деформациями нитей и усилиями сжатия тканых материалов препрегов / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Теоретическая и прикладная механика. – 2012. – Выпуск 27. - С. 97 – 102.

24. Коэффициенты внутреннего трения для мультиаксиальных тканей / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Теоретическая и прикладная механика. – 2012. - Выпуск 27. – С. 309 – 314.

Патенты

25. Способ определения неупругой составляющей при сжатии неотвержденного композиционно-волокнистого материала: пат. Российской Федерации, RU 2452951 C1 / В.М. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин, С.В. Сахоненко, И.В. Зубак; заявитель ОАО «Авангард». – № 2011117792/15; заявл. 03.05.2011; опубл. 10.06.2012 // Бюл. № 16 / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2012. – № 6. – С. 124.

26. Способ определения параметров функциональной зависимости силы внутреннего трения для мультиаксиальных тканей: пат. Российской Федерации, RU 2 457 327 C1 / В.М. Сахоненко, К.А. Горелый, Е.В. Малютин, С.В. Сахоненко, И.В. Зубак; заявитель ОАО «Авангард». – № 2011130340/15; заявл. 20.07.2011; опубл. 20.11.2012 // Бюл. № 32 / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2012. – №4. – С. 1–2.

РЭЗІЮМЭ

Малюцін Яўген Віктаравіч

Метады вызначэння параметраў для вырабу шпангоўтаў складанай формы з канструкцыйных армаваных матэрыялаў

Ключавыя словы: напружана-дэфармаваны стан, перамяшчэнні, дэфармацыі, пругкасць, ўраўненні раўнавагі, прэпрэг, кампазіцыйна-кудзелісты матэрыял, сямейства нітак, торавае абалонка.

Аб'ект і прадмет даследавання. Аб'ект даследавання - тканіны гладкага перапляцення і мультыаксіальных тканіны ва ўмовах іх трансфармацыі. Прадмет даследавання - мадэль трансфармацыі элементарнай ячэйкі тканіны пры намотванні шпангоўтаў складанага сячэння і пры кладцы тканых нарыхтовак на выпуклыя паверхні.

Мэта і вынікі даследавання. Даследаванне і тэарэтычнае абгрунтаванне метадаў разліку працэсу трансфармацыі тканых матэрыялаў для вырабу шпангоўтаў складанага сячэння і інтэгральных падмацаваных абалонкавых канструкцый, вырабленых шляхам кладкі тканых нарыхтовак на выпуклыя паверхні аправак. У адпаведнасці з гэтай мэтай у рабоце вырашаны наступныя задачы.

1. Распрацаваны метады вызначэння гранічных дэфармацый няпругкага зруху тканіны гладкага перапляцення і мультыаксіальных тканін; метады аправак ў чатырохшарнірай раме шляхам эксперыментальных выпрабаванняў тканін.

2. Выкананы тэарэтычныя даследаванні па азначэнні няпругкага складніка дэфармацыі і модуля пругкасці пры папярочным сціску кожнага сямейства нітак для тканін гладкага перапляцення і мультыаксіальных тканін. Эксперыментальна пацверджаны атрыманыя тэарэтычныя вынікі.

3. Распрацаваны геаметрычны падыход да вылічэння няпружкіх дэфармацый зруху для тканін артаганальнага армавання і неартаганальных біаксіальных сіметрычных тканін. Разліковая мадэль прадугледжвае свабоднае перамяшчэнне канцоў нітак пры дэфармацыі і ўлічвае вялікія дэфармацыі, г.зн. з'яўляецца нелінейнай.

4. Распрацавана мадэль трансфармацыі элементарнай ячэйкі тканіны пры намотванні шпангоўтаў складанага сячэння. Вырашаны прамая і зваротная задачы па вызначэнні параметраў намоткі пры заданні зыходнай або канчатковай формаў абалонкі ва ўмовах праектавання.

5. Распрацаваны спосаб кладкі тканай нарыхтоўкі на выпуклыя паверхні выраба, так каб нарыхтоўка ляжала на паверхні апраўкі без зморшчын і гофры і датыкалася з ёй усімі кропкамі ў наваколлі кантакту.

6. Даказана адзінасць рашэння задачы аб магчымасці кладкі тканай нарыхтоўкі на выпуклыя паверхні шляхам прыкладання расцягваючых намаганняў да канцоў нітак у адпаведнасці з абраным напрамкам і заданнем перамяшчэння канцоў нітак.

РЕЗЮМЕ

Малютин Евгений Викторович

Методы определения параметров для изготовления шпангоутов сложной формы из конструкционных армированных материалов

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, перемещения, деформации, упругость, уравнения равновесия, препрег, композиционно-волоконистый материал, семейство нитей, торовая оболочка.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – ткани гладкого переплетения и мультиаксиальные ткани в условиях их трансформации. Предмет исследования – модель трансформации элементарной ячейки ткани при намотке шпангоутов сложного сечения и при укладке тканых заготовок на выпуклые поверхности.

Цель и результаты исследования. Исследование и теоретическое обоснование методов расчета процесса трансформации тканых материалов для изготовления шпангоутов сложного сечения и интегральных подкрепленных оболочечных конструкций, изготовленных путем укладки тканых заготовок на выпуклые поверхности оправок. В соответствии с этой целью в работе решены следующие задачи.

1. Разработан метод определения предельных деформаций неупругого сдвига ткани гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей; метод апробирован в четырехшарнирной раме путем экспериментальных испытаний тканей.

2. Выполнены теоретические исследования по определению неупругой составляющей деформации и модуля упругости при поперечном сжатии каждого семейства нитей для тканей гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей. Экспериментально подтверждены полученные теоретические результаты.

3. Разработан геометрический подход к вычислению неупругих деформаций сдвига для тканей ортогонального армирования и неортогональных биаксиальных симметричных тканей. Расчетная модель предполагает свободное перемещение концов нитей при деформации и учитывает большие деформации, т.е. является нелинейной.

4. Разработана модель трансформации элементарной ячейки ткани при намотке шпангоутов сложного сечения. Решена прямая и обратная задачи по определению параметров намотки при задании исходной или конечной форм оболочки в условиях проектирования.

5. Разработан способ укладки тканой заготовки на выпуклые поверхности изделия, так чтобы заготовка лежала на поверхности оправки без складок и гофров и соприкасалась с ней всеми точками в области контакта.

6. Доказана единственность решения задачи о возможности укладки тканой заготовки на выпуклые поверхности путем приложения растягивающих усилий к концам нитей в соответствии с выбранным направлением и заданием перемещения концов нитей.

SUMMARY

Evgeny Malutin

Methods of determining the parameters for the manufacture of frames complex form of structural reinforced materials

Key words: deflected state, displacement, strain, elasticity, equilibrium equations, prepreg, textile composite, threads family, torus shell.

The object and subject of the study. The objects of study are plain-woven and multiaxial fabrics during transformation. The subject of the study is the transformation model of the tissue cell during compound cross-section frames winding and textile pieces laying on a convex surface.

The purpose and results of the study. The research and theoretical basis of calculation methods of the woven materials transformation for the manufacture of compound cross-section frames and integral reinforced shell structures made by textile pieces laying on the convex surface of the mandrel. In line with this objective, the following tasks we resolved.

1. The method for determining the limit of the inelastic shift for plain-woven and multiaxial fabrics is developed. The experimental tissues testing in four-hinge frame approved the method.

2. Theoretical studies to determine the inelastic component of the strain and modulus of elasticity in the transverse compression of each threads family for plain-woven and multiaxial fabrics performed. The received theoretical results confirmed experimentally.

3. The geometric approach to the inelastic shear strain calculation for textiles of the orthogonal reinforcement and non-orthogonal symmetric biaxial fabrics is developed. The computational model assumes free movement of thread ends during the deformation and takes into account large deformations, thus it is nonlinear.

4. The transformation model of tissue cell for compound cross-section winding frames is developed. Direct and inverse problems of determining the winding parameters when setting the initial or final form of shell are solved.

5. The method of laying the woven preform on the convex surface without folds or corrugations being in contact with mandrel in all points of the contact area is developed.

6. The uniqueness of the solution of the possibility of laying the textile preform on the convex surface by applying a tensile force to the threads ends in accordance with the selected direction of movement and giving the movement of thread ends is proved.