

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права

УДК 539.374.002.62

ФЕДОТОВ
Денис Александрович

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ
КИНЕТИКИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ СВЯЗУЮЩЕГО
И ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Минск, 2023

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный
руководитель

ВАСИЛЕВИЧ Юрий Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и механика материалов» Белорусского национального технического университета

Официальные
оппоненты:

МОЖАРОВСКИЙ Валентин Васильевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной математики и программирования УО «Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины»;

ШИЛЬКО Сергей Викторович,

кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией механики композитов и биополимеров Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого» НАН Беларуси

Оппонирующая
организация

Белорусский государственный университет

Защита состоится «08» декабря 2023 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Белорусского национального технического университета Д 02.05.07 по адресу: 220013 г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря 275 74 26; e-mail: Pavel.Shirvel@yandex.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «01» ноября 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.07
кандидат физ.-мат. наук, доцент



П. И. Ширвель

© Федотов Д. А., 2023

© Белорусский национальный
технический университет, 2023

ВВЕДЕНИЕ

Напряжения, в особенности в радиальном направлении, могут быть весьма опасными из-за малой прочности стеклопластиков на растяжение перпендикулярно волокнам, и поэтому они могут стать источником трещин. Такое случается, например, при формировании толстостенных намоточных изделий. Следовательно, правильная их оценка необходима как для регулирования распределения напряжений в процессе изготовления тех или иных конструктивных элементов, так и для создания монолитных намоточных изделий со стабильными механическими свойствами.

Технология изготовления изделий в форме тела вращения начинается с намотки пропитанной ткани на оправку и заканчивается снятием с оправки изделия, прошедшего этапы разогрева, полимеризации и охлаждения. Таким образом, весь цикл переработки полимерно-композитных материалов можно разбить на этапы, для каждого из которых в диссертации принята своя модель среды, учитывающая структурную неоднородность материала. Предложенные модели сред соответствуют точности информации о свойствах компонентов композита, их упаковке и взаимодействии.

Для каждого этапа выведены свои определяющие уравнения, основанные на допущении, что время установления локального равновесного состояния намного меньше характеристического времени наблюдаемого этапа. Предполагается, что материал полуфабриката (препрег) состоит из двух фаз – нелинейно упругого цилиндрически анизотропного наполнителя и неотвержденного связующего. Этап полимеризации разбит на две стадии: на первой – связующее находится в жидком состоянии, на второй – связующее обладает свойствами твердого тела. На всех этапах рассмотрено напряженное состояние композита, к которому привел основной вид нагружения, действующий во время рассматриваемой технологической операции.

Постановка решенных задач исходила из нужд производства изделий из полимерно-композитных 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 2016–2020 гг., утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19.04.2010 г. № 585.

Работа выполнена в рамках задания «Механика 1.28 «Создание математических и механических моделей расчета напряженно-деформированного состояния цилиндрических труб и других конструктивных изделий из композитов, включая функционально-градиентные, применяющихся в машиностроении и в отраслях теплоэнергетики» ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении».

Цель и задачи исследования. Целью работы является применение свойств препрегов для исследования напряжений в цилиндрических оболочках в условиях производства. Экспериментальное подтверждение и теоретическое обоснование

разработанных методов нахождения напряжений, возникающих при полимеризации связующего и охлаждении композита.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать механико-математическую модель для расчета напряжений в композитном материале цилиндрических оболочек, возникающих при химической усадке связующего в процессе его полимеризации;
- выполнить расчет напряженного состояния в цилиндрической оболочке в результате химической усадки связующего, находящегося на стадии полимеризации как в жидком, так и в твердом состоянии;
- провести исследования температурных деформаций с использованием структурной неоднородности композитного материала цилиндрических оболочек;
- получить решение задачи о влиянии изменения объема связующего при его полимеризации на напряженное состояние в цилиндрическом препреге;
- разработать метод теоретических и экспериментальных исследований по определению модуля упругости цилиндрической оболочки из препрега в радиальном направлении;
- провести экспериментальные исследования по тензометрированию цилиндрической оболочки из композитного материала в процессе ее изготовления.

Объектом исследования являются композитные материалы, находящиеся в условиях объемной усадки компонентов композита.

Предмет исследования – метод решения задачи о влиянии объемной усадки компонентов композита на изменение напряженного состояния и на величину механических характеристик, связывающих линейно напряжения и деформации.

Научная новизна диссертационной работы заключается в рассмотрении напряженного состояния композита на всех этапах изготовления изделий в форме тела вращения, к которому привел основной вид нагружения, действующий во время рассматриваемой технологической операции; в разделении при этом этапа полимеризации на две стадии: на первой – связующее находится в жидком состоянии, на второй – связующее обладает свойствами твердого тела с целью определения напряженного состояния на каждой из них; в методе исследования, применительно к препрегам – методе расчета напряжений в композитном материале цилиндрических оболочек при химической усадке связующего в процессе полимеризации и при воздействии температурного градиента в процессе охлаждения с использованием структурной неоднородности композитного материала, связанной условиями совместности деформаций связующего и наполнителя с экспериментальным подтверждением соответствующих методов нахождения напряжений, возникающих при полимеризации связующего и охлаждении композита.

Положения, выносимые на защиту. Новыми результатами, выносимыми на защиту диссертации, являются:

1. Механико-математическая модель и метод расчета напряжений в композитном материале цилиндрических оболочек в состоянии препрега при химической усадке связующего в процессе полимеризации и при воздействии температурного градиента. Такой метод основан на разделении деформаций компонент препрега в условия их совместности.
2. Расчет напряженного состояния в цилиндрической оболочке в результате химической усадки связующего и температурных напряжений с использованием

структурной неоднородности композитного материала. Сравнение полученных результатов решения температурной задачи с классическим решением В. В. Болотина, проведенного в условиях замены структурно неоднородного материала локально однородным.

3. Решение задачи о влиянии изменения объема связующего при его полимеризации или при охлаждении на напряженное состояние в цилиндрическом препреге. При этом показано, что усадка связующего при его полимеризации и охлаждении цилиндрического композита влияет на величину механических характеристик, связывающих линейно напряжения и деформации композита, функциональные зависимости для которых имеют связь с механическими характеристиками связующего и наполнителя.

4. Метод теоретических и экспериментальных исследований по определению модуля упругости материала цилиндрической оболочки из препрега в радиальном направлении.

5. Результаты экспериментальных исследований по нахождению модуля упругости для цилиндрического препрега в радиальном направлении и результаты тензометрирования цилиндрической оболочки из композитного материала в процессе ее изготовления. Закономерность, что радиальные перемещения и вызывающая их нагрузка находятся в линейной зависимости. По результатам обработки экспериментальных исследований установлено, что модуль упругости препрега в радиальном направлении не зависит ни от толщины ни от температуры препрега. По результатам тензометрирования цилиндрической оболочки из композита установлено, что в процессе ее изготовления изменение относительного удлинения в кольцевом направлении следует рассматривать в пределах температурных интервалов: (20, 60) °С, (60, 100) °С и (100, 160) °С.

Личный вклад соискателя ученой степени. Теоретические и экспериментальные исследования, представленные в работе, выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторстве. На всех этапах теоретических и экспериментальных исследований соискатель разрабатывал аналитические модели, проводил эксперименты, осуществлял поиск и анализ исходных данных, проводил численные исследования, анализировал и обобщал полученные результаты. Основные положения, выводы и рекомендации принадлежат автору. Научное направление, цель, задачи и методология исследований разработаны совместно с научным руководителем, профессором Ю. В. Василевичем. Другие соавторы совместных публикаций оказывали помощь при обсуждении методик проведения экспериментальных исследований, анализе и проверке полученных результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные положения и результаты работы докладывались, обсуждались и защищались на следующих научных конференциях: Четырнадцатая Всероссийская научная конференция молодых исследователей «Шаг в будущее» (Москва, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Российская федерация, 2007), Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Российская федерация, 2008), Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи (Москва, ОАО «ГАО «Всероссийский выставочный центр», Российская федерация, 2009), Региональный

конкурс проектов и программ XI Всероссийской выставки НТТМ-2011 (Смоленск, филиал ГОУ ВПО «Московский энергетический институт» (технический университет), Российская федерация, 2011), Научно-практическая конференция «Тенденции развития современной науки» (Волоколамск, Российская федерация, 2011), Международная заочная научно-практическая конференция (Липецк, Российская федерация, 2014), Третья международная научно-техническая конференция «Аэро-космические технологии» (Москва, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Российская федерация, 2014), «Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники» (Звездный городок, Российская федерация, 2016), XXI Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов (Королев, Российская федерация, 2017), Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи» (Томск, Томский политехнический университет, Российская федерация, 2017), IX Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, Московский авиационный институт, Российская федерация, 2017), X Общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос», посвященная памяти дважды Героя Советского Союза летчика-космонавта Георгия Михайловича Гречко (Санкт-Петербург, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, Российская федерация, 2018), Международная специализированная выставка «Машиностроение-2018» (Минск, Республика Беларусь, 2018), Всероссийские конференции по проблемам новых технологий (Миасс, МСНТ, Российская федерация, 2013–2020), 35 Международная научно-техническая конференция «Технология-Оборудование-Инструмент-Качество» (Минск, Республика Беларусь, 2020).

Результаты, представленные в диссертационной работе, использовались при выполнении проекта АО «Авангард» по производству дымовых труб, предназначенных для завода по термическому обезвреживанию твердых отходов на стадии расчета прочности конструкции.

Опубликование результатов диссертации. Основные положения и содержание диссертации опубликованы в 2 монографиях (общий объем 25,1 авторского листа); 4 статьях в научных журналах в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республики Беларусь (общим объемом 2,1 авторского листа); 3 статьях в других научных изданиях, 18 статьях в сборниках материалов конференций и 4 тезисах докладов (общий объем 10,5 авторского листа) и одном патенте на изобретение. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 37,7 авторского листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав основного текста, заключения, библиографического списка и приложений. Она изложена на 153 страницах, из которых 132 страницы содержат основной текст с рисунками и таблицами, 13 страниц содержат список использованных источников, включающих авторские и 8 страниц содержат приложения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проведен аналитический анализ литературных источников по теме диссертации, перечислены и раскрыты свойства препрегов, а также описаны технологические операции, которые можно проводить с композитными материалами в состоянии препрега: формование торковых оболочек, укладка ткани на выпуклые поверхности, формование шпангоутов сложного сечения, прокалывание отверстий.

Под препрегом понимается композитный материал, состоящий из тканого материала гладкого переплетения, пропитанного связующим, находящимся в неотвержденном состоянии. Препреги настолько податливы, что обладают некоторыми свойствами пластичности. Такое обстоятельство открывает перед технологами большие возможности, позволяющие в некоторых случаях упростить оснастку, уменьшить период изготовления изделия, повысить качество изделия и его прочностные свойства.

Важной областью использования препрегов является формование изделий на гибких оправках, например, путем изгиба из цилиндрической оболочки можно получить торковую. Прежде чем конструировать изделие, необходимо знание многих параметров, которые влияют на качество. Основой для разработки этих параметров является предположение о том, что армирующий материал оболочки в состоянии препрега имеет возможность перемещаться со скольжением на конечные расстояния под воздействием внешней нагрузки. При составлении уравнений равновесия необходимо учитывать силу трения. Это сделано К. А. Горелым в диссертации при создании механико-математической модели по расчету напряженно-деформированного состояния.

Предельные деформации волокон при растяжении в направлении армирования не превышают 3–4 %. В то же время деформация тканей в направлениях, отличных от направлений армирования, намного больше. Исходя из этого заготовку ткани можно уложить на некоторую выпуклую поверхность без складок так, чтобы она соприкасалась с поверхностью. Варьируя нагрузку, при определенных условиях можно изменять форму заготовки.

Перспективным направлением создания оболочек с внутренними и наружными кольцевыми ребрами жесткости является схема намотки плоской ленты, которая состоит из двух семейств армирующих волокон, расположенных под определенными углами к продольному направлению. Процессу деформирования плоской ленты в кольцо – заготовку соответствует свой закон изменения угла армирования. С учетом этого для выбранного технологического процесса необходимо знать размеры заготовки. Математическая обработка способа изготовления подобного шпангоуга проведена в диссертации Е. В. Малютина.

При получении отверстий традиционными методами в стенке уже отвержденных композитных деталей происходит перерезание нитей и, как следствие, потеря прочности при растяжении материала, растрескивание связующего и расслоение композитного материала по стенке отверстия. Альтернативой просверленным отверстиям является формование их методом прокалывания в еще неотвержденном полимерно-волокнистом материале конструкции. Расчет напряженно-

деформированного состояния композита в районе проколотого отверстия проведен в диссертации С. В. Сахоненко.

Проведение испытаний образцов на растяжение и испытания образцов на срез показало, что конструкции с проколотыми отверстиями в полтора раза прочнее по сравнению с конструкциями, у которых отверстия просверлены, разрушающие напряжения на срез у образцов с проколотыми отверстиями в 2–3 раза больше, чем у образцов с просверлёнными отверстиями.

В рамках исследования свойств препрегов проведены испытания на срез резьбы, полученной в препреге методом прокола. По результатам испытаний были выделены этапы получения резьбы методом прокола и сделаны следующие выводы: для ткани Т-13П отверстие $\varnothing 20$ мм является предельным размером при его проколе; конструкции с проколотыми отверстиями примерно в два раза прочнее по сравнению с конструкциями, у которых отверстия просверлены. В результате проведенных исследований был получен патент на изобретение № 2680513 отражающий способ изготовления резьбы в композиционно-волокнутом материале путем прокалывания индентором неотвержденного материала с раздвижением арматуры у изделия. Основное отличие данного способа заключается в том, что с целью получения резьбы на поверхности отверстия применяется прокалывающий элемент, у которого на цилиндрической части нарезана резьба, причем прокол осуществляется путем вращения заостренного индентора.

В главе 2 представлены теоретические исследования прочности полимерно-композитного материала, описано влияние усадки связующего при его полимеризации в процессе формирования на напряженно-деформируемое состояние композита.

На всех этапах изготовления изделий в форме тела вращения рассмотрено напряженное состояние композита, к которому привел основной вид нагружения, действующий во время рассматриваемой технологической операции. Так на этапе намотки основным видом нагружения является натяжение ткани при намотке. Этап разогрева – это действие градиента температуры. Этап полимеризации характеризуется химической усадкой связующего. Этап охлаждения сопровождается термической усадкой композита.

К числу важнейших характеристик процесса отверждения относятся объемная усадка и количество выделяющихся низкомолекулярных веществ (летучих). Объемная усадка при отверждении обусловлена увеличением плотности связующего в процессе отверждения в результате возникновения большого числа новых химических связей, и ее следует отличать от температурной усадки, связанной с охлаждением. Объемная усадка снижается с увеличением молекулярного веса олигомеров и уменьшением числа функциональных групп в них. Структурные напряжения от термической усадки определяются в основном различием коэффициентов теплового расширения наполнителя и связующего и обычно рассчитываются для постоянных значений тепловых и упругих характеристик компонентов в интервале изменения температуры. Поскольку коэффициент теплового расширения связующего меняется в процессе отверждения, а измерение этого коэффициента неизбежно сопровождается отверждением, то разделение на химическую и термическую составляющие носит условный характер.

Деформация незаполимеризованного связующего состоит из двух частей – упругой, которая мгновенно изменяется с изменением напряжения; и так называе-

мой высокоэластической, которая развивается в течение некоторого времени. При этом высокоэластическая деформация на несколько порядков больше по сравнению с упругой. В некоторых случаях она компенсирует стеснение деформаций между компонентами композита. Связующее можно считать вполне упругим материалом с линейной зависимостью между напряжениями и деформациями при статическом нагружении, когда реализуется равновесное состояние материала.

Глава 3 посвящена исследованию влияния процессов разогрева оболочки из препрега и полимеризации связующего в жидком состоянии на изменение напряженного состояния в цилиндрическом препреге. Рассматривается пропитанная полимерным связующим стеклоткань, намотанная на оправку. Стеклоткань намотана с натяжением, поэтому полимер сжат первоначально. Под воздействием температуры происходит его полимеризация, сопровождающаяся химической усадкой. Объемная деформация полимера ε в заданном направлении вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\rho}{3 \cdot E_c}, \quad (1)$$

где ρ – давление сжатия полимера; E_c – линейный модуль упругости полимера при сжатии.

В главе показано, что процесс разогрева цилиндрической оболочки из препрега не влияет на изменение напряженного состояния в композитном материале, так как высокоэластичная деформация связующего устраняет стеснение деформаций между компонентами композита. Эти процессы, происходящие при разогреве цилиндрической оболочки, подтверждены путем экспериментальных исследований.

Влияние усадки эпоксидного связующего, обладающего свойствами жидкости при его отверждении, на напряжения в намоточных изделиях описывается с помощью уравнений, полученных из условий равновесия и совместности деформаций наполнителя и связующего:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= m \cdot (\varepsilon_{rc} + \varepsilon_c) + \varepsilon_{rH} (1 - m), & \varepsilon_\theta &= \varepsilon_{\theta H}, \\ \sigma_{rH} &= \sigma_r = \sigma_{rc} = \sigma_{\theta c} = \rho, & \sigma_\theta &= m \cdot \rho + (1 - m) \sigma_{\theta H}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ε_r , ε_θ – осредненные деформации препрега в радиальном и кольцевом направлениях; m – относительное содержание связующего в препреге; ε_{rc} , ε_{rH} – деформация связующего и наполнителя в радиальном направлении; ε_c – химическая деформация связующего; $\varepsilon_{\theta H}$ – деформация нитей в кольцевом направлении; σ_{rH} , $\sigma_{\theta H}$ – напряжения в наполнителе в радиальном и кольцевом направлениях; σ_r , σ_θ – осредненные напряжения препрега в радиальном и кольцевом направлениях соответственно; σ_{rc} , $\sigma_{\theta c}$ – напряжения в связующем в радиальном и кольцевом направлениях.

Закон Гука в условиях сжатия для неотвержденного связующего имеет вид:

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_{\theta c} = \frac{\rho}{E_c} = \frac{\sigma_r}{E_c} \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\theta c}$ – деформации связующего в кольцевом направлении.

Выражение (3) подтверждено экспериментальными исследованиями ткани Т-13П, пропитанной связующим ЭП-5122. Испытания проводились при разной температуре окружающей среды на специально разработанном приспособлении. При этом установлено, что E_c не зависит от температуры препрега.

В условиях симметричной деформации с учетом (1) существует зависимость между радиальным перемещением u и компонентами деформации ε_r и ε_{θ} в виде равенств (условия Коши):

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_{\theta} = \frac{u}{r}, \quad (4)$$

где r – текущий радиус оболочки композита.

В предположении, что материал наполнителя (нити) является изотропным и подчиняется закону Гука, зависимости (2) – (4) с уравнением равновесия приводят к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} b_{11} \cdot \sigma_r + b_{12} \cdot \sigma_{\theta} &= m \cdot \varepsilon_c, \quad b_{21} \cdot \sigma_r + b_{22} \cdot \sigma_{\theta} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r}(\sigma_r - \sigma_{\theta}) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение системы (5) с учетом условия, что $E_H \gg E_c$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= c \cdot \left(\frac{a}{r}\right)^{k_1} + \frac{k_2}{k_1}, \quad \sigma_{\theta} = -c \cdot \frac{b_{11}}{b_{12}} \left(\frac{a}{r}\right)^{k_1} - \frac{k_2}{k_1} \frac{b_{11}}{b_{12}} + k_2, \\ E_r &= \sqrt{\frac{(1-m)}{m}} E_c E_H, \quad E_{\theta} = (1-m) E_H, \\ \nu_{r\theta} &= \sqrt{m(1-m)} \frac{E_H}{E_c} + n - 1, \quad \nu_{\theta r} = \sqrt{\frac{n^2}{m(1-m)}} \frac{E_H}{E_c}, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} c &= k_2 \frac{b_{12}(1-n) - b_{11}}{b_{11} + n \cdot b_{12}}; \quad k_1 = \sqrt{m(1-m)} \frac{E_H}{E_c} + 1; \quad k_2 = \frac{m \cdot \varepsilon_c}{b_{12}} \\ n &= m + (1-m) \nu_H; \quad b_{11} = \frac{1}{E_r} - \frac{m}{E_c}; \quad b_{12} = \frac{\nu_H}{E_H} - \frac{\nu_{r\theta}}{E_{\theta}}; \\ b_{21} &= m - (1-m) \left(\nu_{\theta r} \frac{E_H}{E_r} - \nu_H \right); \quad b_{22} = (1-m) \frac{E_H}{E_{\theta}} - 1; \end{aligned}$$

где E_r и E_{θ} – осредненные модули упругости препрега в радиальном и кольцевом направлениях; E_H – модуль упругости наполнителя; $\nu_{r\theta}$ и $\nu_{\theta r}$ – коэффициенты Пуассона в радиальном и кольцевом направлениях; ν_H – коэффициент Пуассона напол-

нителя; a – внутренний радиус оболочки; $b_{11}, b_{12}, b_{21}, b_{22}, k_1, k_2$ – коэффициенты для упрощения выражения.

Соотношения (6) решают поставленную задачу о влиянии усадки связующего в жидком состоянии при полимеризации на изменение напряженного состояния в цилиндрической оболочке.

Глава 4 посвящена экспериментальным исследованиям по определению модуля упругости цилиндрической оболочки из препрега и тензометрированию цилиндрической оболочки из композитного материала в процессе ее изготовления.

Для нахождения радиального модуля упругости E_r^0 получено соотношение:

$$\beta = \sqrt{\frac{E_\theta^0}{E_r^0}} = -\frac{E_\theta^0 \cdot \Delta u_b \left(\frac{b}{a} \right)^{2\beta} + 1}{T_0 \left(\frac{b}{a} \right)^{2\beta} - 1}, \quad (7)$$

где Δu_b – перемещение наружных слоев намотанного кольца; b – наружный радиус кольца; T_0 – натяжение наружного слоя ткани; $E_\theta^0 = E_\theta = (1 - m) E_H$. Введение индекса «0» в параметрах $E_r, E_\theta, \nu_{r\theta}$ и $\nu_{\theta r}$ констатирует их отличие от тех же параметров (6), которые необходимо применять в зависимостях (6), отражающих напряжения в препреге, возникающие в результате химической усадки связующего. Параметры $E_r^0, E_\theta^0, \nu_{r\theta}^0, \nu_{\theta r}^0$ предназначены для использования их при решении классических задач теории упругости. После нахождения β модуль упругости E_r^0 определяется путем вычисления по формуле:

$$E_\theta^0 = \beta^2 \cdot E_r^0.$$

При проведении экспериментальных исследований измерялось изменение длины наружной окружности намотанного кольца $(\Delta u_b)_{ij}$ под нагрузкой T_i при температуре препрега t_j . Для исследований была выбрана ткань Т-13П, пропитанная связующим ЭП-5122. При намотке на оправку диаметром 200 мм натяжение ткани составляло $T = 1$ Н/мм. Испытания проводились при температуре окружающей среды от 20 °С до 160 °С на приспособлении, показанном на рисунке 1.



Рисунок 1 – Приспособление для проведения испытаний для определения трансверсального модуля упругости

Результаты испытания в зависимости от температуры $t, ^\circ\text{C}$ и нагрузки T, H для толщины $H = 10$ мм намотанного пакета ткани представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения кольцевого перемещения $\vartheta_i, \text{мм}$ в зависимости от температуры $t_j, ^\circ\text{C}$ и нагрузки T_i, H

$t, ^\circ\text{C}$	$T_1=10$	$T_2=20$	$T_3=30$	$T_4=40$	$T_5=50$	$T_6=60$	$T_7=70$	$T_8=80$	$T_9=90$
20	1,30	2,87	3,84	4,73	5,70	6,68	7,57	8,63	9,25
40	1,23	2,35	3,17	4,73	5,47	6,64	7,83	8,37	9,37
60	2,60	4,20	5,20	6,53	7,37	8,50	10,02	10,57	11,90
80	2,90	4,57	5,93	7,30	8,55	9,53	10,56	11,39	12,90
100	1,10	1,90	3,10	4,40	6,05	7,17	8,24	8,74	10,20
130	1,09	2,40	3,86	4,62	5,95	7,44	8,43	8,84	10,10
160	1,18	2,57	4,23	4,90	6,60	7,58	9,12	9,65	11,10

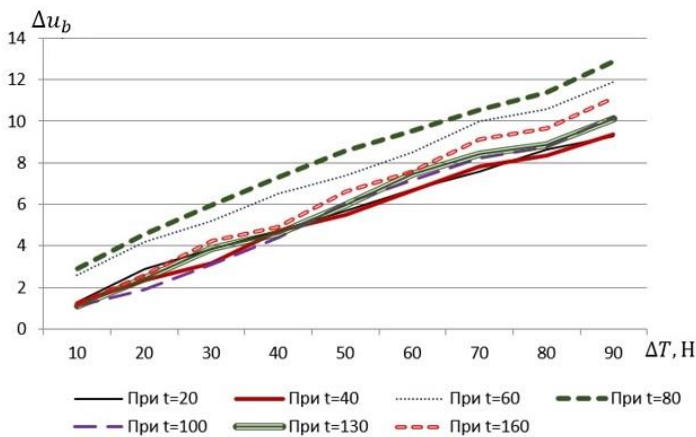
Анализ таблицы показал, что в ней значения всех строк можно аппроксимировать линейной функцией, которая выражает зависимость между перемещением u_{ij} и нагрузкой T_i (рисунок 2). Причём установлена зависимость

$$(\Delta u_b)_{ij} = \Delta u_j^0 + \Delta u_j^1 \cdot \Delta T_i. \quad (8)$$

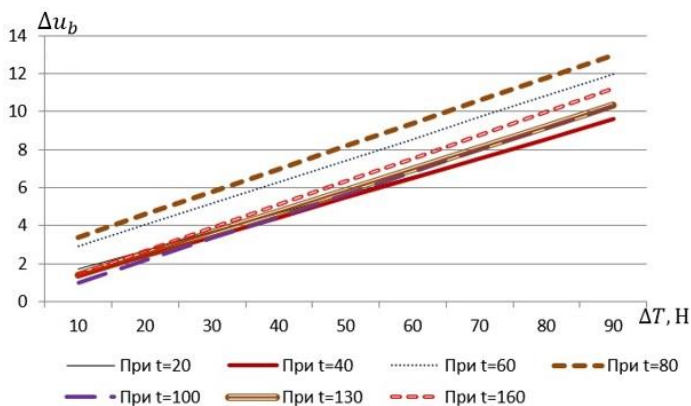
Здесь Δu_j^0 измеряется в мм и представляет собой неупругую составляющую перемещения; Δu_j^1 измеряется в мм/Н и отвечает за упругую составляющую перемещения.

На рисунке 2, а показан график экспериментальных исследований результатов, представленных в таблице 1. Рисунок 2, б выражает соответствующие теоретиче-

ские зависимости. Коэффициенты Δu_j^0 и Δu_j^1 вычислялись методом наименьших квадратов. С учётом толщины намотки и температуры окружающей среды они показаны в таблице 2. Здесь же в таблице приведены результаты расчётов модуля упругости $(E_r^0)_j$.



a



b

a – графики экспериментальных исследований результатов; *b* – графики соответствующих теоретических зависимостей

Рисунок 2– Графики зависимости перемещения Δu_b от нагрузки ΔT для разных температур окружающей среды ($H = 10$ мм)

Таблица 2 – Значения Δu_j^0 , Δu_j^1 и $(E_r^0)_j$

$t, ^\circ\text{C}$	$H = 10 \text{ мм}$			$H = 16 \text{ мм}$			$H = 18 \text{ мм}$			$H = 30 \text{ мм}$		
	Δu_j^0 , мм	Δu_j^1 , мм/Н	$(E_r^0)_j$, МПа	Δu_j^0 , мм	Δu_j^1 , мм/Н	$(E_r^0)_j$, МПа	Δu_j^0 , мм	Δu_j^1 , мм/Н	$(E_r^0)_j$, МПа	Δu_j^0 , мм	Δu_j^1 , мм/Н	$(E_r^0)_j$, МПа
20	0,10	0,74	0,52	0,12	0,51	0,37	0,14	1,25	0,65	0,07	0,19	0,49
40	0,10	0,31	0,46	0,11	0,62	0,43	0,10	0,82	0,52	0,06	0,21	0,58
60	0,11	0,77	0,39	0,10	1,27	0,47	0,11	1,14	0,43	0,08	0,22	0,65
80	0,12	0,31	0,34	0,13	1,45	0,29	0,11	1,25	0,38	0,09	0,68	0,58
100	0,12	0,32	0,36	0,14	1,02	0,23	0,16	1,36	0,19	0,52	0,52	0,33
130	0,11	0,25	0,39	0,12	1,56	0,34	–	–	–	0,14	0,16	0,24
160	0,12	0,21	0,33	0,10	1,21	0,50	0,18	0,77	0,15	0,05	0,54	0,23

Анализ графиков на рисунке 2, б и таблицы 2 подтверждает, что радиальные перемещения и вызывающая их нагрузка находятся в линейной зависимости. Таким образом, гипотеза, выраженная формулой (8), является справедливой для любых толщин намотанного препрега. Можно также считать, что модуль упругости препрега в радиальном направлении не зависит от температуры препрега. Кроме того, неупругая составляющая радиального перемещения оболочки не зависит от температурного градиента и от толщины намоточного препрега.

Предложенный метод экспериментальных исследований по определению модуля упругости цилиндрической оболочки из препрега может быть использован для практических исследований в процессе изготовления изделий из композитов.

Для прослеживания влияния каждого этапа при формировании цилиндрических оболочек на возникновение напряжений в материале композита были проведены испытания. Для этого на оправку диаметром 180 мм была намотана пропитанная связующим ЭП-5122 ткань Т-13П толщиной 30 мм. На глубине $h = 5; 10; 15; 20; 25$ мм от оправки были расположены тензометрические датчики.

Результаты тензометрирования цилиндрической оболочки из композитного материала при разогреве показали, что изменение относительного удлинения ε_0 в кольцевом направлении следует рассматривать в пределах трех температурных интервалов: (20, 60) $^\circ\text{C}$, (60, 100) $^\circ\text{C}$ и (100, 160) $^\circ\text{C}$. На первом температурном интервале относительное удлинение ε_0 увеличивается за счет нагревания препрега и уменьшается вследствие процессов, происходящих при завершении пропитки связующим армирующего материала. На втором участке изменения температуры препрега относительное удлинение осуществляется только за счет температурных деформаций. Третий участок характеризуется изменением деформации ε_0 за счет

химической усадки при полимеризации связующего. Здесь ε_0 переменна по толщине препрега.

Проведенный эксперимент позволил определить величину относительной деформации композита в зависимости от химической усадки связующего на стадии полимеризации. Для этого из относительной деформации, зафиксированной i -м датчиком, вычиталась температурная деформация $\varepsilon_{T_0}(h)$. Согласно проведенным расчетам, она равна 0,00176. На рисунке 3 в зависимости от глубины залегания h тензодатчика показан график изменения относительного удлинения композита, вызванного химической усадкой связующего.

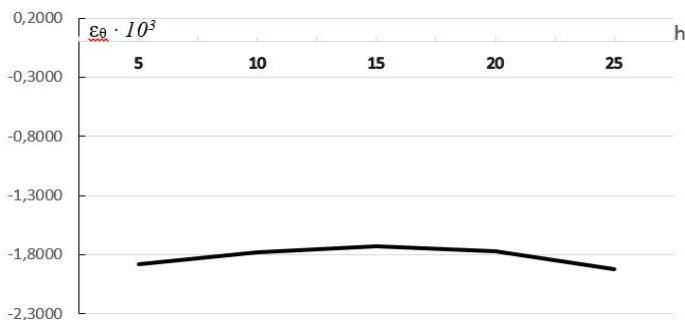


Рисунок 3 – Относительное удлинение композита при химической усадке связующего в результате полимеризации

Охлаждение композита также сопровождается его деформацией в кольцевом направлении. Такая деформация приводит к изменению напряженного состояния в композите. Оценить его можно по величине температурных деформаций от охлаждения цилиндрической оболочки из композита. На рисунке 4 представлен график температурной деформации композита при охлаждении.

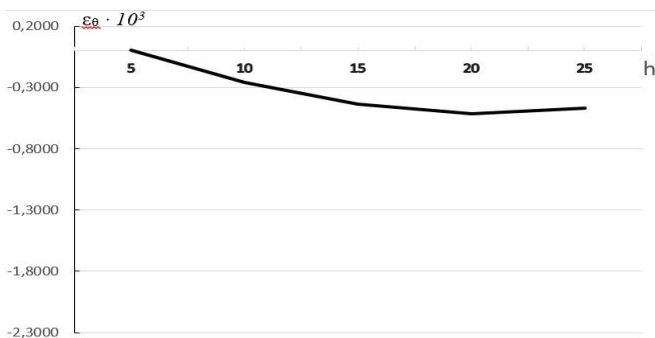


Рисунок 4 – График температурной деформации композита при охлаждении

Анализ исследований по результатам испытаний позволил сделать следующие выводы:

1. При разогреве препрега его деформация в момент снятия показаний имеет постоянное значение для всех датчиков, независимое от толщины оболочки цилиндра.
2. Температурная деформация оболочки при ее разогреве линейна относительно температуры при ее изменении в интервале (60, 100) °С.
3. Деформации оболочки за счет химической усадки связующего и от охлаждения переменны вдоль ее толщины.

График остаточных деформаций, вызванных химической и термической усадкой, представлен на рисунке 5.

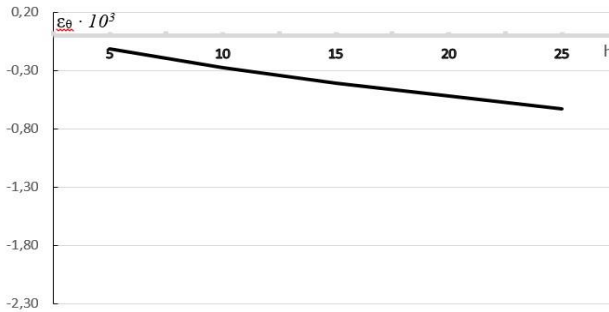


Рисунок 5 – График остаточных деформаций композита

Сделанные выводы по результатам испытаний использовались при определении напряженно-деформируемого состояния в результате химической и термической усадок компонент композита.

Глава 5 описывает влияние полимеризации связующего, находящегося в твердом состоянии и охлаждения изделия на напряженное состояние в композитном материале.

Задача по определению влияния полимеризации связующего решалась с помощью уравнений, которые можно получить из условий равновесия и совместности деформаций наполнителя и связующего, находящегося в твердом состоянии:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= m \cdot (\varepsilon_{rc} + \varepsilon_c) + \varepsilon_{rH} (1 - m), & \varepsilon_\theta &= \varepsilon_{\theta H} = \varepsilon_{\theta c}, \\ \sigma_r &= \sigma_{rH} = \sigma_{rc}, & \sigma_\theta &= m \cdot \sigma_{\theta c} + (1 - m) \sigma_{\theta H}. \end{aligned} \quad (9)$$

С использованием закона Гука и полагая, что связующее и наполнитель являются изотропными, а также уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\theta) = 0 \quad (10)$$

были получены зависимости между напряжениями σ_r и σ_θ в виде соотношений:

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot \sigma_r + a_{12} \cdot \sigma_\theta &= a_1, \\ a_{21} \cdot \sigma_r + a_{22} \cdot \sigma_\theta &= a_2, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= (1-m)v_H + m \cdot v_c - (1-m)v_{\theta r} \frac{E_H}{E_r} - m \cdot v_{\theta r} \frac{E_c}{E_r}; \\ a_{12} &= \left[-E_\theta + (1-m)E_H + m \cdot E_c \right] \frac{1}{E_\theta}; \\ a_{21} &= \frac{1}{E_r} - \frac{m(1-v_c^2)}{E_c} - \frac{(1-m)(1-v_H^2)}{E_H} - \frac{m \cdot v_c + (1-m)v_H}{E_r} v_{\theta r}; \\ a_{22} &= \frac{-v_{r\theta} + m \cdot v_c + (1-m)v_H}{E_\theta}; \quad a_1 = 0; \quad a_2 = m \cdot \varepsilon_c. \end{aligned}$$

Здесь v_c – коэффициент Пуассона связующего.

Полученная система уравнений (11) линейна относительно напряжений σ_r и σ_θ . Коэффициенты a_{11}, \dots, a_{22} этой системы – постоянные числа. Эти коэффициенты определяются неизвестными $E_r, E_\theta, v_{r\theta}$ и $v_{\theta r}$ числами, с помощью которых при химической усадке связующего устанавливается закон Гука между осреднёнными напряжениями и деформациями композитного материала и известными параметрами E_H, E_c, v_H, v_c и m .

Решение задачи при условии $\varepsilon_c = 0$ может быть получено только при условии равенства нулю всех коэффициентов системы (11). Тогда

$$\begin{aligned} E_r^0 &= \frac{E_H \cdot E_c (1 - v_{\theta r}^0 \cdot v_{r\theta}^0)}{m(1 - v_c^2)E_H + (1 - m)(1 - v_H^2)E_c}, \quad E_\theta^0 = (1 - m)E_H + m \cdot E_c, \\ v_{r\theta}^0 &= (1 - m)v_H + m \cdot v_c, \quad v_{\theta r}^0 = \frac{E_r^0}{E_\theta^0} v_{r\theta}^0. \end{aligned} \quad (12)$$

Такие же результаты получены в работах С. Г. Лехницкого. Классические параметры $E_r^0, E_\theta^0, v_{r\theta}^0, v_{\theta r}^0$ обозначают параметры $E_r, E_\theta, v_{r\theta}, v_{\theta r}$ в случае, если $a_{ij} = 0$.

Усадка связующего приводит к тому, что механические коэффициенты в отличие от классических (12) должны измениться. Коэффициенты a_{ij} , при отличной от нуля правой части системы, также не равны нулю. Рассматриваются композитные материалы, у которых $E_r^0 \ll E_\theta^0$. С учетом зависимости $v_{r\theta} > 0$ искомые коэффициенты линейной зависимости между деформацией и напряжениями в композите представляются в виде:

$$\begin{aligned}
E_r &= \sqrt{E_{\theta}^0 \cdot E_r^0}, \quad E_{\theta} = E_{\theta}^0 = (1-m)E_H, \\
\nu_{r\theta} &= \sqrt{\frac{E_{\theta}^0}{E_r^0}} - 1 + \nu_{r\theta}^0, \quad \nu_{\theta r} = \nu_{r\theta}^0 \sqrt{\frac{E_r^0}{E_{\theta}^0}}
\end{aligned} \tag{13}$$

Решение системы (11) получено в виде:

$$\sigma_r = c \left(\frac{a}{r} \right)^{\beta} + \frac{b_2}{\beta}, \quad \sigma_{\theta} = b_2 - \frac{a_{21}}{a_{22}} \left[c \left(\frac{a}{r} \right)^{\beta} + \frac{b_2}{\beta} \right], \tag{14}$$

где

$$\beta = 1 + \frac{a_{21}}{a_{22}}; \quad b_2 = \frac{m \cdot \varepsilon_c}{a_{22}}.$$

Аналогичным образом определено влияние температурного градиента при охлаждении изделия на напряженное состояние композита. С учетом законов Гука для композитного материала, законов Гука для его компонентов и коэффициентов температурного расширения система уравнений:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r + \varepsilon_{Tr} &= m(\varepsilon_{rc} + \varepsilon_{Tc}) + (1-m)(\varepsilon_{rH} + \varepsilon_{TH}), \\
\sigma_r = \sigma_{rH} = \sigma_{rc} \quad \varepsilon_{\theta} + \varepsilon_{T\theta} &= \varepsilon_{\theta H} + \varepsilon_{TH} = \varepsilon_{\theta c} + \varepsilon_{Tc}, \\
\sigma_{\theta} &= m \cdot \sigma_{\theta c} + (1-m)\sigma_{\theta H}
\end{aligned} \tag{15}$$

с уравнением равновесия (10) сводится к системе уравнений (11) для σ_r и σ_{θ} . Только в этом случае

$$\begin{aligned}
a_1 &= m(\varepsilon_{Tc} - \varepsilon_{T\theta})E_c + (1-m)(\varepsilon_{TH} - \varepsilon_{T\theta})E_H, \\
a_2 &= m(\nu_c + 1)\varepsilon_{Tc} + (1-m)(\nu_H + 1)\varepsilon_{TH} - \varepsilon_{Tr} - \nu_{r\theta}^0 \cdot \varepsilon_{T\theta}.
\end{aligned}$$

Решение температурной задачи представлено зависимостями:

$$\sigma_r = c \left(\frac{a}{r} \right)^{\beta} + \frac{b_2}{\beta}, \quad \sigma_{\theta} = b_2 - \frac{a_{21}}{a_{22}} \left[c \left(\frac{a}{r} \right)^{\beta} + \frac{b_2}{\beta} \right], \tag{16}$$

где

$$\beta = 1 + \frac{a_{21}}{a_{22}}; \quad b_2 = \frac{a_1}{a_{12}} = \frac{a_2}{a_{22}}$$

с использованием в них механических параметров, определяемых с помощью зависимостей:

$$\begin{aligned}
E_r^T &= E_r^0 + \sqrt{E_\theta^0 \cdot E_r^0}, \\
E_\theta^T &= E_\theta^0 + \gamma \sqrt{\frac{E_\theta^0}{E_r^0}}, \\
v_{r\theta}^T &= v_{r\theta}^0 + \sqrt{\frac{E_\theta^0}{E_r^0}}, \\
v_{\theta r}^T &= v_{r\theta}^0 \frac{E_r^0}{E_\theta^0} + \frac{\gamma}{\sqrt{E_r^0 \cdot E_\theta^0}} + v_{r\theta}^0 \sqrt{\frac{E_r^0}{E_\theta^0}},
\end{aligned} \tag{17}$$

где

$$\gamma = \frac{a_{11}}{a_{21}} = \frac{a_{12}}{a_{22}} = \frac{a_1}{a_2}.$$

Механические параметры обозначены через E_r^T , E_θ^T , $v_{r\theta}^T$, $v_{\theta r}^T$ для отражения того, что химическая усадка связующего и температурный градиент влияют по-разному на их величины. Постоянная c определена с помощью энергетического метода в предположении, что перед охлаждением цилиндрическая оболочка была освобождена от всех внешних сил.

Процессы химической усадки связующего и термической усадки композита влияют на величину механических характеристик в момент прохождения этих процессов. Они приводят к разным изменениям объемов компонент композита. Коэффициенты линейной зависимости между деформацией и напряжениями в композите в момент трансформации становятся равными (13) и (17) соответственно. Эти коэффициенты используются только в момент установления напряженного состояния в композите, вызванного названными усадками. Для других задач, связанных с внешними нагрузками на композит, необходимо использовать классические коэффициенты линейной зависимости (12).

Решение температурной задачи для цилиндров из композита впервые было получено В. В. Болотиным. Согласно классификации для описания модели материала, введенной В. В. Болотиным, использовался второй уровень **Н**. При такой модели, неоднородный материал заменяется локально однородным эквивалентным по прочности и жесткости материалом, у которого вычисляются макроскопические характеристики композита. Решение, изложенное в диссертации, проведено с использованием первого уровня **h**, для которого характерна структурная неоднородность, связанная условиями совместности деформаций связующего и наполнителя.

Сравнение полученных результатов у В. В. Болотина и в диссертации приведено на графике, представленном на рисунке 6.

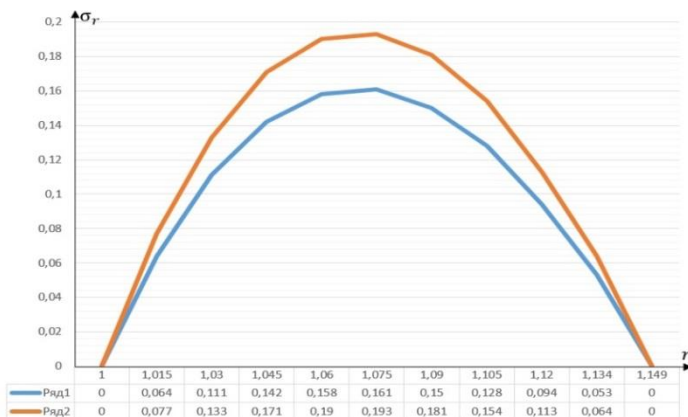


Рисунок 6 – Напряжения σ_r в результате охлаждения оболочки ($w = a / b = 0,87$)

Здесь на рисунке б: Ряд 1 – график σ_r , представляющий расчет на уровне **h**; Ряд 2 – график σ_r , представляющий расчет на уровне **H**; $a = 1$ м – внутренний радиус цилиндра; $b = 1,15$ м – наружный радиус цилиндра.

Анализ графиков на рисунке б показывает, что два способа моделирования сплошной среды приводят к практически одинаковым результатам. Такой же вывод был сделан и для других соотношений между a и b . Таким образом, использование формул, полученных в условиях уровней **h** и **H** для расчета напряженно-деформированного состояния цилиндрических композитов при воздействии на них температурного градиента, практически равносильно.

Процесс образования стеклопластика сопровождается несвободными деформациями полимерной матрицы, возникающими при установившихся физико-химических связях. Основной причиной появления остаточных напряжений являются стеснения деформаций, которые появляются в результате изменения первоначальных объемов отверждающегося полимера. Сопровождающие их релаксационные процессы, а также различие в коэффициентах линейного температурного расширения материалов, также являются причиной появления остаточных напряжений.

Авторы работы «Остаточные напряжения в намоточных элементах конструкций из армированных пластиков» предлагают приближенную теорию управления остаточными напряжениями, связывающую остаточные напряжения с начальными напряжениями намотки, процессами полимеризации и с изменениями температуры.

С остаточными напряжениями обычно связывают радиальные напряжения σ_0 , которые могут быть весьма опасными из-за малой прочности стеклопластиков на растяжение перпендикулярно волокнам, и поэтому они могут стать источником трещин. Выражение для напряжения σ_0 выведено в виде:

$$\sigma_0 = \frac{1}{(\beta_* - 1) \cdot s} (\rho_{0i})^{\beta_* - 1} \sum_{j=1}^l T_j (\rho_{0j})^{1 - \beta_*} + \sigma_r^1 + \sigma_r^2 + \sigma_r^3 + P_0 \cdot (\rho_{0i})^{-\beta_* - 1}, \quad (17)$$

$$\rho_{0i} = \frac{r_i}{a}; \quad (i = 1, \dots, l); \quad \beta_* = \sqrt{\frac{(1-m)E_H}{E_r^*}},$$

где r_i – точки, на которые разбит отрезок $[a, b]$; на интервалах $r_i < r < r_i + 1$ натяжение полотна ткани T_i постоянно, таким образом осуществляется аппроксимация натяжения T ; s – толщина ткани; E_r^* – модуль упругости композита в радиальном направлении (определяется экспериментально); σ_r^1 и σ_r^2 напряжения в полуфабрикате, возникающие при химической усадке связующего в жидком и твердом состояниях соответственно (вычисляются по формулам (6) и (14)); σ_r^3 –напряжение, возникающее при охлаждении композита (вычисляется по формуле (16)); P_0 – давление на оправку.

$$P_0 = \frac{1}{(\beta_* - 1) \cdot s} (\rho_{0i})^{\beta_* - 1} \sum_{j=1}^l T_j (\rho_{0j})^{1 - \beta_*} + (\sigma_r^1 + \sigma_r^2 + \sigma_r^3) \Big|_{r=a}$$

По результатам расчетов для одного и того же материала напряжения σ_r^1 намного меньше остальных. Это объясняется существованием высокоэластической деформации неотвержденного связующего, которая уменьшает напряжения в препреге.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана механико-математическая модель и метод расчета напряжений в композитном материале цилиндрических оболочек в состоянии препрега при химической усадке связующего в процессе полимеризации и при воздействии температурного градиента. Такой метод основан на разделении деформаций компонент препрега в условии их совместности. Это позволило оценить остаточные напряжения, вызванные нагрузками в виде усадки связующего или температурным градиентом [1; 2; 3; 4; 6; 7; 8; 10; 12; 20; 24; 25].

2. Выполнен расчет напряженного состояния в цилиндрической оболочке в результате химической усадки связующего и температурных напряжений с использованием структурной неоднородности композитного материала. Проведено сравнение полученных результатов решения температурной задачи с классическим решением В. В. Болотина, проведенного в условиях замены структурно неоднородного материала локально однородным. Показано, что эти решения отличаются незначительно, т. е. приводят к практически одинаковым результатам [1; 2; 9; 18; 19; 21; 22; 27; 29; 30; 32].

3. Решена задача о влиянии изменения объема связующего при его полимеризации или при охлаждении на напряженное состояние в цилиндрическом препреге. При этом показано, что усадка связующего при его полимеризации и охлаждении цилиндрического композита влияет на величину механических характеристик,

связывающих линейно напряжения и деформации композита, функциональные зависимости для которых имеют связь с механическими характеристиками связующего и наполнителя. При этом полученные выражения в виде формул для расчета механических характеристик композита отличаются от классических, если изменение объема полимера не равно изменению объема наполнителя в процессе трансформации композита [1; 2; 4; 6; 15; 16; 20; 26].

4. Разработан метод теоретических и экспериментальных исследований по определению модуля упругости материала цилиндрической оболочки из препрега в радиальном направлении. Это позволило использовать его в формулах для расчета остаточных напряжений [1; 2; 5; 11; 13; 14; 23; 28].

5. Приведены результаты тензометрирования цилиндрической оболочки из композитного материала в процессе ее изготовления. Показано, что радиальные перемещения и вызывающая их нагрузка находятся в линейной зависимости. При этом по результатам обработки экспериментальных исследований установлено, что модуль упругости препрега в радиальном направлении не зависит ни от толщины, ни от температуры препрега. По результатам тензометрирования цилиндрической оболочки из композита установлено, что в процессе ее разогрева изменение относительного удлинения в кольцевом направлении следует рассматривать в пределах температурных интервалов: (20, 60) °С, (60, 100) °С и (100, 160) °С. На первом температурном интервале относительное удлинение увеличивается за счет нагревания препрега и уменьшается вследствие процессов, происходящих при завершении пропитки связующим армирующего материала. На втором участке изменения температуры препрега относительное удлинение осуществляется только за счет температурных деформаций. Третий участок характеризуется изменением деформации за счет химической усадки при полимеризации связующего [1; 2; 17; 31].

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

Получено дальнейшее развитие теории препрегов, что отразилось в разработке механико-математической модели для расчета остаточных напряжений в композитных материалах цилиндрических оболочек при температурных и химических усадках связующего в процессе его полимеризации. Все эти задачи, вернее их постановка, нашли отражение при проектировании и изготовлении изделий из композитов, и исходили из нужд производства. Продолжение научных исследований в теории препрегов поможет не только решению задач, поставленных производством, но и подтолкнет развитие производства путем внедрения научных разработок.

Разработанная модель расчета напряженно-деформированного состояния в композитах может быть использована для конструирования новых изделий на основе цилиндрических и других осесимметричных оболочек и является основой для исследования прочностных и деформационных характеристик в создаваемых инженерно-технических изделиях.

Результаты проведенных исследований уже нашли применение в производственной практике изготовления изделий из гетерогенных полимерных материалов, что отражено в акте внедрения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1. Василевич, Ю. В. Применение свойств препрегов в технологических процессах изготовления изделий из композиционных материалов / Ю. В. Василевич, К. А. Горелький, А. В. Сахоненко, С. В. Сахоненко, К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // Материалы XXXVII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий, посвященной 70-летию Государственного ракетного центра им. академика В. П. Макеева. – М.: Российская академия наук, 2017. – 154 с.

2. Василевич, Ю. В. Расчетное обоснование использования свойств препрегов в условиях производства изделий из композиционных материалов / Ю. В. Василевич, Э. Б. Епишин, Е. В. Малютин, В. М. Сахоненко, С. В. Сахоненко, К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. – М.: Российская академия наук, 2019. – 299 с.

Статьи в рецензируемых журналах и сборниках трудов

3. Федотов, Д. А. Исследования прочности отверстий, полученных методом прокола / Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов // Труды МАИ. – № 98. – 2018. – 28 с.

4. Василевич, Ю. В. Исследование процесса формирования композита на этапе полимеризации связующего / Ю. В. Василевич, Д. А. Федотов, В. М. Сахоненко, С. В. Сахоненко // Международный научно-техн. сборник «Теоретическая и прикладная механика». – Минск: БНТУ, 2018. – № 33. – С. 299–306.

5. Василевич, Ю. В. Результаты экспериментальных исследований по определению радиального модуля упругости в цилиндрической оболочке из препрега / Ю. В. Василевич, В. М. Сахоненко, Е. Ю. Неумержицкая, Д. А. Федотов // Международный научно-техн. сборник «Теоретическая и прикладная механика». – Минск: БНТУ, 2019. – № 34. – С. 45–52.

6. Василевич, Ю. В. Моделирование напряженного состояния в осесимметричной оболочке с учетом анизотропных свойств композиционного материала / Ю. В. Василевич, Е. Ю. Неумержицкая, Л. Н. Беляцкая, К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // Международный научно-техн. сборник «Теоретическая и прикладная механика». – Минск: БНТУ, 2020. – № 35. – С. 30–35.

Статьи в других научных изданиях

7. Федотов, Д. А. Зависимость между напряжениями и деформациями при двухосном растяжении тканей гладкого переплетения / Д. А. Федотов, А. В. Андронов // Будущее машиностроения России: Сборник трудов Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов / Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. – М., 2008. – С. 282.

8. Горелький, К. А. Технологические схемы изготовления изделий с использованием свойств препрегов в условиях производства / К. А. Горелький, С. В. Сахоненко, Е. В. Малютин, И. В. Зубак, К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // Итоги науки: Избранные труды Всероссийского симпозиума по механике и процессам управления. – М.: Российская академия наук, 2016. – № 24. – С. 3–37.

9. Горелький, К. А. Теоретические и экспериментальные исследования прочности стеклопластика в районе проколотых отверстий / К. А. Горелький, С. В. Сахоненко, Е. В. Малютин, Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов. – М.: Итоги науки, 2016. – № 27.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

10. Федотов, Д. А. Способ вычисления интегралов вдоль дуги кривой, имеющей точки спрямления / Д. А. Федотов // Шаг в будущее: материалы XIV Всероссийской научной конференции молодых исследователей. – М.: Науч.-техн. ассоц. «Актуал. проблемы фундам. наук», 2008. – Т. 10.

11. Скворцов, К. Г. Моделирование процесса изготовления торовой оболочки из цилиндрической в состоянии препрега / К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов, В. М. Сахоненко, К. А. Горелый // Тенденции развития современной науки: Научно-практическая конференция. – Волоколамск: Филиал МГОУ в г. Волоколамске, 2011. – С. 30–34.

12. Федотов, Д. А. Постоянный слагаемые закона Гука / Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов, В. М. Сахоненко, К. А. Горелый // Тенденции развития современной науки: Научно-практическая конференция. – Волоколамск: Филиал МГОУ в г. Волоколамске, 2011. – С. 35–40.

13. Федотов, Д. А. Внутреннее трение в тканых материалах / Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов // Проблемы современной науки и их решения: Сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции. – Липецк: Липецкая областная общественная организация Всероссийского общества изобретателей и рационализаторов, 2012. – С. 44–49.

14. Сахоненко, В. М. Методика определения трансверсального модуля упругости намотанного препрега / В. М. Сахоненко, К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // Сборник материалов молодежной конференции «Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники». – Звездный городок: ООО «12 апреля», 2016. – С. 101–106.

15. Горелый, К. А. Расчет напряжений в препреге, возникающих в результате химической усадки связующего / К. А. Горелый, Е. В. Малютин, С. В. Сахоненко, К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов, А. В. Сахоненко // Новые технологии: материалы XIII Всероссийской конференции, посвященной памяти референта МСНТ Н. Н. Ершовой. – М.: Российская академия наук, 2016. – С. 25–35.

16. Горелый, К. А. Свойства препрегов при их деформировании / К. А. Горелый, С. В. Сахоненко, А. В. Сахоненко К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // Наука и технологии: материалы XXXVII Всероссийской конференции, посвященной 70-летию Государственного ракетного центра им. академика В. П. Макеева. – М.: Российская академия наук, 2017. – Т. 1. – С. 46–54.

17. Горелый, К. А. Напряжения в препреге при намотке с учетом вязкости связующего / К. А. Горелый, С. В. Сахоненко, А. В. Сахоненко К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // Наука и технологии: материалы XXXVII Всероссийской конференции, посвященной 70-летию Государственного ракетного центра им. академика В. П. Макеева. – М.: Российская академия наук, 2017. – Т. 2. – С. 28–34.

18. Скворцов, К. Г. Теоретические и экспериментальные исследования прочности стеклопластика в районе проколотых отверстий / К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов, В. М. Сахоненко // Сборник докладов Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики». – Томск: Издательство ТПУ, 2017. – С. 199–200.

19. Горелый, К. А. Получение отверстий и формование резьбы в стеклопластике методом прокола / К. А. Горелый, Е. В. Малютин, С. В. Сахоненко,

К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // Наука и технологии: материалы XXXVIII Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Южно-Уральского государственного университета. – М.: Российская академия наук, 2018. – Т. 1. – С. 62–70.

20. Горелький, К. А. Динамика изменения напряжений в намоточных изделиях на этапе полимеризации связующего / К. А. Горелький, С. В. Сахоненко, К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов, И. В. Зубак // Новые технологии: материалы XV Всероссийской конференции. – М.: Российская академия наук, 2018. – Т. 1. – С. 19–27.

21. Василевич, Ю. В. Испытания на срез композитного материала с проколотым отверстием / Ю. В. Василевич, Е. Ю. Неумержицкая, С. В. Сахоненко, Д. А. Федотов // 33 Междунар. научно-техн. конф. «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки». В рамках международной специализированной выставки «Машиностроение-2018». – Минск, 2018. – С. 37–38.

22. Федотов, Д. А. Формирование отверстий и резьбы высокого качества в композиционном материале методом прокальвания / Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов // Молодежь. Техника. Космос: труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции. – СПб., 2018. – С. 290–296.

23. Сахоненко, В. М. Формирование шпангоутов сложного сечения / В. М. Сахоненко, С. В. Сахоненко, Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов // Наука и технологии: материалы XXXIX Всероссийской конференции. – М.: Российская академия наук, 2019. – Т. 1. – С. 13–22.

24. Епишин, Э. Б. Этапы изготовления цилиндрической оболочки из композитов / Э. Б. Епишин, С. В. Сахоненко, Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов // Фундаментальные и прикладные проблемы науки: материалы XIV Международного симпозиума. – М.: Российская академия наук, 2019. – Т. 1. – С. 13–24.

25. Епишин, Э. Б. Применение принципа возможных перемещений Лагранжа к композиционным системам в виде препрегов / Э. Б. Епишин, С. В. Сахоненко, Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов // Механика и процессы управления: материалы XLIX Всероссийского симпозиума. – М.: Российская академия наук, 2019. – С. 3–14.

26. Федотов, Д. А. Влияние химической усадки связующего на напряжения в препреге / Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов // Люльевские чтения: материалы двенадцатой межрегиональной отраслевой научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. – С. 162–163.

27. Василевич, Ю. В. Альтернатива проколотого отверстия просверленному, при соединении конструктивных изделий из армированных композитных материалов / Ю. В. Василевич, Е. Ю. Неумержицкая, К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // 35 Международная научно-техническая конференция «Технология-Оборудование-Инструмент-Качество». – Минск, 2020. – № 35.

Тезисы докладов

28. Федотов, Д. А. Неупругая составляющая при сжатии ткани / Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов // III областная выставка-ярмарка научно-технического творчества молодежи. – Смоленск: Главное управление по делам молодежи Смоленской обл. Филиал ГОУ ВПО «Московский энергетический институт», 2011. – С. 15.

29. Скворцов, К. Г. Исследования прочности отверстий, полученных методом прокола / К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов // Тезисы докладов XXI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. – Королев, 2017. – С. 141–142.

30. Федотов, Д. А. Исследования прочности отверстий, полученных методом прокола / Д. А. Федотов, К. Г. Скворцов // Аннотации конкурсных работ: 9-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». – М.: Московский авиационный институт, 2017. – С. 261–263.

31. Василевич, Ю. В. Механика релаксации напряжений в полимерных материалах / Ю. В. Василевич, Е. Ю. Неумержицкая, Д. А. Федотов // Тезисы докл. Международная научно-техническая конф. «Полимерные композиты и трибология» («Поликомтриб-2019»). – Гомель, 2019. – С. 253.

Патент

32. Способ получения резьбы в неотвержденном композиционно-волоконистом материале: пат. RU 2680513 / В. М. Сахоненко, К. Г. Скворцов, Д. А. Федотов. – Оpubл. 21.02.2019.

РЕЗЮМЕ

Федотов Денис Александрович

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ КИНЕТИКИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ СВЯЗУЮЩЕГО И ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ

Ключевые слова: полимеризация, напряженно-деформированное состояние, напряжение, деформация, усадка, композитный материал, препрег, цилиндрическая оболочка

Объект и предмет исследования. Объект исследования – композитные материалы, находящиеся в условиях объемной усадки компонентов композита. Предмет исследования – метод решения задачи о влиянии объемной усадки компонентов композита на изменение напряженного состояния и на величину механические характеристик, связывающих линейно напряжения и деформации.

Цель и результаты исследования. Экспериментальное подтверждение и теоретическое обоснование применения разработанных методов нахождения напряжений, возникающих при полимеризации связующего и охлаждении композита. С этой целью в работе решены следующие задачи.

1. Разработана механико-математическая модель для расчета напряжений в композитном материале цилиндрических оболочек, возникающих при химической усадке связующего в процессе его полимеризации.

2. Впервые получены уравнения для определения напряженного состояния в цилиндрической оболочке в результате химической усадки связующего, находящегося на стадии полимеризации, как в жидком, так и в твердом состояниях.

3. Проведен расчет температурных деформаций с использованием структурной неоднородности композитного материала цилиндрических оболочек.

4. Решена задача о влиянии изменения объема связующего при его полимеризации на напряженное состояние в цилиндрическом препреге.

5. Разработан метод теоретических и экспериментальных исследований по определению модуля упругости цилиндрической оболочки из препрега в радиальном направлении.

6. Разработан метод экспериментальных исследований по тензометрированию цилиндрической оболочки из композитного материала в процессе ее изготовления.

Разработанная модель расчета напряженно-деформированного состояния в композитах может быть использована для конструирования новых изделий на основе цилиндрических и других осесимметричных оболочек и является основой для исследования прочностных и деформационных характеристик в создаваемых инженерно-технических изделиях.

SUMMARY

Denis Fedotov

STRESSED STATE OF CYLINDRICAL COMPOSITE SHELLS, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE KINETICS OF BINDER POLYMERIZATION AND WINDING PARAMETERS

Key words: polymerization, stress-strain state, stress, deformation, shrinkage, composite material, prepreg, cylindrical shell

The object and subject of the study. The object of the study is composite materials under conditions of volumetric shrinkage of composite components. The subject of the study is a method for solving the problem of the effect of volumetric shrinkage of composite components on the change in the stress state and on the value of the stiffness characteristics connecting linear stresses and strains.

The purpose and results of the study. Experimental confirmation and theoretical proof of the application of the developed methods for finding the stresses arising during the polymerization of the binder and cooling of the composite. For this purpose, the following tasks were solved in the work.

1. A mechanical and mathematical model for calculating stresses in a composite material of cylindrical shells that arise during chemical shrinkage of the binder during its polymerization has been developed.

2. For the first time, equations to determine the stress state in a cylindrical shell as a result of chemical shrinkage of the binder which is at the stage of polymerization in both liquid and solid states have been obtained.

3. The calculation of thermal deformations using the structural heterogeneity of the composite material of cylindrical shells has been carried out.

4. The problem of the effect of changing the volume of the binder during its polymerization on the stress state in a cylindrical prepreg has been solved.

5. A method of theoretical and experimental research to determine the elastic modulus of a cylindrical prepreg shell in the radial direction has been developed.

6. A method of experimental research on strain gauging of a cylindrical shell made of a composite material in the process of its manufacture has been developed.

The developed model for calculating the stress-strain state in composites can be used to design new products based on cylindrical and other axisymmetric shells and is the basis for studying the strength and deformation characteristics in the created engineering products.

Научное издание

ФЕДОТОВ

Денис Александрович

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ
КИНЕТИКИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ СВЯЗУЮЩЕГО
И ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Подписано в печать 30.10.2023. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,57. Уч.-изд. л. 1,41. Тираж 65. Заказ 929.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.