

Белорусский национальный технический университет

УДК 539.374.002.62

**Горелый
Константин Александрович**

**Моделирование напряженно-деформированного
состояния в торовых оболочках, изготовляемых
из гетерогенных полимерных материалов**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Минск, 2012

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», профессор кафедры «Вычислительная математика и программирование»;

Кравчук Александр Степанович,
доктор физико-математических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация

ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В.А.Белого НАН Беларуси»

Защита состоится « 26 » октября 2012 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 « 25 » сентября 2012 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.07

кандидат физико-математических наук, доцент



Нифагин В.А.

© Горелый К.А., 2012

© Белорусский национальный
технический университет, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Технические изделия, изготовленные из полимерно-волоконистых материалов, широко используются в инженерной практике. Внедрение новых типов изделий сопряжено с необходимостью выполнения научно-исследовательских работ по изучению напряженно-деформированного состояния, возникающего в создаваемых изделиях для обеспечения требуемого качества изготовления.

Полимерно-волоконистая композиционная среда, находящаяся в неотвержденном состоянии полимеров, т. е. в состоянии препрега, является объектом исследования в настоящей работе. Препреги настолько податливы, что обладают некоторыми свойствами пластичности. Это позволяет проводить с ними глубокую переработку. В результате уже сформированное изделие может приобрести новые формы с изменением размеров. В результате появляется возможность, позволяющая в некоторых случаях упростить оснастку, уменьшить время изготовления изделия, повысить качество изделия и его прочностные свойства.

Основное свойство препрегов – это возможность неупругого сдвига со скольжением между собой нитей армирующего материала при нагружении. Такое обстоятельство приводит к невозможности применения уравнений совместности деформаций при построении модели расчета напряженно-деформированного состояния препрегов. При составлении уравнений равновесия необходимо учитывать силу трения. Таким образом, при создании механико-математической модели по расчету напряженно-деформированного состояния необходимо разработать новые базовые положения, основывающиеся на свойствах гетерогенных полимерных материалов.

Одной из важных областей использования препрегов является формование изделий на гибких оправках, например, путем изгиба из цилиндрической оболочки можно получить торовую. Установление для этого технологических параметров является первоочередной задачей. Как показали проведенные исследования, использование элементов механико-математической модели препрегов позволило досконально изучить явления, происходящие при преобразованиях цилиндрической оболочки в торовую и решить поставленную задачу.

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

Разработать механико-математическую модель по расчету напряженно-деформированного состояния в торových оболочках, изготавливаемых из гетерогенных полимерных материалов; исследовать процессы, происходящие в препрегах при формовании торových оболочек и выработать практические рекомендации по их изготовлению. В соответствии с этой целью в работе решены следующие задачи.

1. Разработана механико-математическая модель расчета напряженно-деформированного состояния торových оболочек, изготавливаемых из гетерогенных полимерных материалов, к числу которых относятся препреги.

2. Решена важная в практическом отношении задача о нахождении условий управления технологическими параметрами для качественного формования торových оболочек из цилиндрических препрегов.

3. Разработаны программы и методики по определению коэффициентов внутреннего трения. Проведены испытания и определены коэффициенты внутреннего трения для стеклоткани Т-13, угольной ткани 56313 и биаксиальной ткани ВХ-470.

4. Получены расчетные формулы, описывающие неупругое поперечное сжатие семейств нитей у тканей гладкого переплетения и у биаксиальных тканей. Разработаны методы и способы определения неупругого поперечного сжатия тканей. Экспериментально установлены максимальные значения неупругого поперечного сжатия стеклоткани Т-13, угольной ткани 56313 и биаксиальной ткани ВХ-470.

5. Определена зависимость силы трения от вязкости связующего, температуры препрега и от скорости деформирования препрега. Основные выводы подтверждены результатами соответствующих испытаний.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – полимерно-волокнистая композиционная среда, находящаяся в неотвержденном состоянии полимеров, т. е. в состоянии препрега. Предмет исследования – построение механико-математической модели среды, описывающей поведение композитов при их деформировании в условиях неотвержденного состояния полимеров.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Механико-математическая модель расчета напряженно-деформированного состояния торových оболочек, изготавливаемых из гетерогенных полимерных материалов, к числу которых относятся препреги. Модель учитывает физико-механические свойства препрегов, особенности строения тканей, температуру переработки, вязкость связующего, скорость деформирования армирующего материала, что позволило адекватно описать реально происходящие процессы при формовании торových оболочек.

2. Условия управления параметрами для качественного формования торových оболочек из цилиндрических препрегов, одним из которых является управление напряженно-деформированным состоянием препрега в процессе изготовления оболочки. Для качественного формования торových оболочек, исключая образование складок (гофр), не рекомендуется допускать сжа-

тия армирующего материала не только в продольном направлении к нитям, но и упругого сжатия в плоскости ткани в поперечном направлении к ним.

3. Зависимости силы трения армирующих элементов торových оболочек от скорости деформирования полимерных материалов, напряжений и перемещений в нитях тканого материала. Доказано, что сила трения не зависит от вязкости связующего в диапазоне (1,1- 63) °Е и температуры переработки в пределах (24–90)°С. Оптимальной скоростью деформации при формировании торовой оболочки из цилиндрической является 300 мм/мин. Достоверность полученных результатов подтверждена на основе проведенных экспериментальных исследований и внедрения их в технологию изготовления торových оболочек.

4. Дифференциальные уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние в армирующем материале торových оболочек. Для их решения разработан метод определения деформационных характеристик арматуры препрега. Получены формулы для расчета перемещений концов типового элемента нити в виде половины витка спирали с началом в нижней точке цилиндрической оболочки и концом – в верхней. Метод основан на результате экспериментальных исследований деформаций двух типов идентичных цилиндрических оболочек, материал которых в одном случае обладает свойствами препрега, в другом – упругого тела.

5. Функциональные зависимости силы трения от напряжений в нитях и величины давления между слоями ткани и методики проведения экспериментальных исследований для определения коэффициентов, входящих в эти зависимости для тканей гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей, и неупругой составляющей при поперечном сжатии препрегов. На основании методик проведены испытания и впервые определены коэффициенты трения и максимальные значения неупругого поперечного сжатия для стеклоткани Т-13, угольной ткани 56313 и биаксиальной ткани ВХ-470.

Личный вклад соискателя

Теоретические и экспериментальные исследования, обобщенные в представленной работе, выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторстве. 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 в совместных публикациях оказывали помощь в проведении экспериментальной части работы, анализе и проверке результатов исследований, выполнении отдельных компьютерных расчетов.

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 г.

Опубликованность результатов диссертации

Основные положения диссертации опубликованы в 15 работах, в том числе в 3 статьях в научных журналах согласно перечню ВАК Республики Беларусь (1,8 авторских листов), в 5 статьях в научных журналах, 6 статьях в материалах конференций и одном патенте 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 118 страниц основного текста, 20 рисунков, 20 таблиц, библиографический список из 119 наименований, включая 15 публикаций соискателя, и занимает 9 страниц. Диссертация включает приложение на 2 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены общие вопросы, касающиеся объекта исследования – полимерно-композиционного материала, находящегося в состоянии полуфабриката, т.е. в виде структуры взаимно-перпендикулярных семейств волокон (нитей), пропитанных полимерным связующим. Связующее не отверждено. Дано обоснование актуальности темы диссертации и общая характеристика современного состояния исследований по теме научной работы. Осуществлен обзор отечественных и зарубежных работ, близких по содержанию к теме диссертации. Дано подробное описание свойств препрегов, основным из которых является их исключительная податливость. Это позволяет проводить с ними глубокую переработку. В результате уже сформированное изделие может приобрести новые формы с изменением размеров. При этом если соблюдать заранее рассчитанные технологические параметры (геометрические размеры, силовые факторы, температуру среды и т. д.), то в процессе переработки в армирующем материале препрега не будут возникать значительные напряжения, влияющие на качество изделия.

Важной областью использования свойств препрегов является формирование изделий на гибких оправках. Вообще говоря, понятие «гибкие оправки» является относительным. Дело в том, что первоначальное формование заготовки изделия должно осуществляться, когда оправка является жесткой. В дальнейшем при трансформации полученной заготовки оправка должна менять форму в соответствии с заданной программой. В этом смысле и принимается термин «гибкие оправки».

«Гибкие оправки» могут быть разной конфигурации. Это зависит от поставленной задачи, которую она должна выполнить. Например, имеются разнообразные конструкции оправок, которые состоят из кольцевых конических дисков со сквозными профильными отверстиями. Через эти отверстия протянуты гибкие канаты. Система натяжения канатов позволяет обеспечить плотную стыковку дисков и жесткость собираемой под заданным углом оправки. В частном случае оправка может быть и прямолинейной. Таким образом, сначала

на прямолинейную оправку наматывается тканый материал, образующий цилиндрическую оболочку, а затем, используя систему натяжения канатов, превращают ее в торовую оболочку. Существует технология (на примере газоведа 72 СП324, Ø34 мм, см. рисунок 1), которая осуществляется методом контактного формования вручную. Оптимальные параметры и режимы формования торовых оболочек рассчитаны по методике, предложенной в данной работе (более подробная информация содержится в главе 4).



Рисунок 1 – Газовод 72 СП324

Исходя из научных результатов, полученных в первой главе диссертации, следуют выводы.

1. Важную роль в структурной организации композиционных материалов играет ориентация наполнителя в матрице, приводящая к анизотропии свойства композита. Анизотропия свойств материала является одним из определяющих регулируемых параметров при конструировании инженерных изделий. Управление анизотропией свойств осуществляется варьированием укладки арматуры, что обеспечивает повышение несущей способности изделия и приводит к существенному снижению ее массы.

2. На прочностные характеристики мультиаксиальных тканей существенное влияние оказывают прошивные швы. При растяжении ткани вдоль швов выявлена неупругая составляющая деформации, которая имеет наименьшую величину у стягивающих строчек; для остальных швов она в разы больше.

Экспериментально установлено, что если на стадии формования изделия неупругая составляющая деформации реализована, то прочностные свойства композита после полимеризации связующего будут больше, чем для нереализованного случая. Следовательно, плановая разработка изделия из композита на основе мультиаксиальной ткани должна учитывать неупругую составляющую деформации шва.

3. Тканые материалы, являющиеся в основном двумерными структурами, проявляют хорошую стабильность свойств во взаимно-ортогональных направлениях основы и утка. Они характеризуются более сбалансированными свойствами в плоскости ткани. Легкость управления свойствами и низкая стоимость изготовления делают стеклоткани и мультиаксиальные ткани широкодоступными для конструктивных применений.

4. К определяющим внутренним силовым факторам, возникающим в изделиях из препрегов при действии внешней нагрузки, относятся: растягивающие усилия в нитях, усилия сжатия нитей в поперечном направлении, сила тре-

ния скольжения при смещении нитей одного семейства по нитям второго.

5. Для изготовления торowych оболочек наиболее прогрессивным и экономичным является применение метода изгиба цилиндрической оболочки в состоянии препрега в торовую. При этом первоочередными задачами, требующими решения в данной области, являются:

- построение механико-математической модели препрегов;
- установление оптимальных параметров процесса формования торowych оболочек на гибких оправках.

Во второй главе разработан метод исследования напряженно-деформированного состояния препрегов. Метод предусматривает использование следующих определяющих допущений: тканые материалы создаются из нитей и первоначально обладают высокой гибкостью. Существуют две причины наличия этой гибкости: 1) гибкость самой нити, состоящей из тонких параллельных волокон; 2) структура ткани создается путем переплетения нитей без жесткой связи в местах переплетения. Это означает, что перемещения отдельных нитей или волокон в структуре, вызванные усилиями, приложенными к ткани, имеют свойства, аналогичные свойствам тела с подвижной структурой.

Под действием внешней нагрузки могут возникать растягивающие напряжения в нитях, усилия сжатия нитей в поперечном направлении, взаимное смещение нитей одного семейства по нитям второго семейства. При этом в месте их соприкосновения возникает сила сопротивления их относительному скольжению, т. е. сила трения скольжения. Величина этой силы зависит от многих факторов, основными из которых являются: способ переплетения семейств нитей; вязкость связующего, а следовательно, температура композиционного материала; давление внутри слоев пакета. Сила трения скольжения между семействами нитей может принимать значения от нуля до значения $\tau_{пр}$ - предельной силы трения скольжения. Значение силы трения скольжения при равновесии ограничивается неравенством

$$\tau \leq \tau_{пр}. \quad (1)$$

Величина силы трения будет равна $\tau_{пр}$ лишь тогда, когда действующая на нить сдвигающая сила достигает такого значения, что при малейшем ее увеличении нити начинают двигаться (скользить).

При установлении функциональной зависимости компонент силы трения от напряжений в нитях и величины давления между слоями тканей были приняты следующие гипотезы и положения.

1. Гипотеза об абсолютной гибкости нитей, формирующих ткани.
2. В каждом поперечном сечении, мысленно проведенном внутри препрега, действует распределенная нагрузка, заменяющая влияние отброшенной части препрега.
3. Предполагается, что в своем начальном состоянии препрег свободен от напряжений, имеет постоянную температуру и находится в термодинамическом равновесии со средой.

4. Рассматриваются только статические задачи в условиях равновесия.

На этом основании установлено, что для тканей гладкого переплетения между предельными силами трения скольжения и усилиями растяжения в нитях имеют место функциональные зависимости

$$\begin{aligned}\tau_1^{\text{пр}} &= k_{11}\sigma_{11} + k_{12}\sigma_{22} \sin^2 \alpha + \mu_1 p, \\ \tau_2^{\text{пр}} &= k_{21}\sigma_{11} + k_{22}\sigma_{22} \sin^2 \alpha + \mu_2 p,\end{aligned}\quad (2)$$

где $\tau_1^{\text{пр}}$ и $\tau_2^{\text{пр}}$ – компоненты предельной силы трения в проекциях на направления распространения соответствующего семейства нитей; α - угол между нитями семейств; σ_{11} и σ_{22} - напряжения растяжения в нитях семейств; p - удельное давление между слоями ткани; k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} , μ_1 и μ_2 – постоянные, отождествляемые с коэффициентами трения и определяемые экспериментально по методике, изложенной в третьей главе.

Для мультиаксиальных тканей к каждому семейству нитей основных слоев применим полученный закон

$$\tau_i^{\text{пр}} = k_i \sigma_{\Pi} \sin^2 \alpha_i + \mu_i p = \tau_i^0 + \mu_i p, \quad (3)$$

где i – номер слоя семейства нитей, принадлежащих ткани; α_i - угол, который составляет i - ый слой стеклонитей с прошивной нитью; σ_{Π} - напряжение растяжения в прошивной нити; k_i и μ_i - постоянные числа, отождествляемые с коэффициентами трения и определяемые экспериментально по методике, описанной в главе 3.

При изгибе цилиндрической оболочки внешняя нагрузка уравнивается растягивающими и сжимающими в поперечном направлении напряжениями в нитях, пока не наступит равновесие между усилиями в нитях и силами трения. Такой процесс характерен для композитов в состоянии препрега.

Одним из основных условий для качественного изготовления торовых оболочек является отсутствие сжимающих напряжений в нитях в продольном направлении к ним. Однако нити могут сжиматься в плоскости ткани в поперечном направлении к ним. При таком сжатии допускаются только неупругие деформации. Упругие деформации достаточной величины, на основании приведенных экспериментальных исследований, приводят к потере устойчивости армирующего материала, в результате чего страдает качество изготовленного изделия. На этом основании не следует допускать сжатие не только в продольном направлении к нитям, но и упругое сжатие в плоскости ткани в поперечном направлении к ним. Таким образом, знание напряжений в нитях армирующего материала при изгибе цилиндрической оболочки является инструментом для проведения дальнейших исследований и выработки практических рекомендаций по изготовлению торовых оболочек. Разработанная методика изготовления торовых оболочек на гибких оправках предполагает использование как тканей гладкого переплетения, так и биаксиальных тканей.

В результате имеем следующую постановку задачи. Растянутая нить равнономерными напряжениями σ_0 , имеющая длину $L = \frac{\pi R_0}{\sin \varphi_0}$, равную половине витка спирали, подверглась нагрузке, которая переместила ее концы на расстояния, определяемые равенствами (4).

$$\begin{aligned}u_1 &= -\frac{R_0 \operatorname{ctg} \varphi_0}{R \sin \varphi_0} R_0 \cos \theta_0 + y_0 \frac{\pi}{2} + \theta_0 + \frac{R_0 \sigma_0}{E \sin \varphi_0} \theta_0 + \frac{\pi}{2}, \\ u_2 &= \frac{R_0 \operatorname{ctg} \varphi_0}{R \sin \varphi_0} R_0 \cos \theta_0 - y_0 \frac{\pi}{2} - \theta_0 - \frac{R_0 \sigma_0}{E \sin \varphi_0} \theta_0 - \frac{\pi}{2}.\end{aligned}\quad (4)$$

Здесь E - модуль упругости нити при растяжении; R_0 - радиус цилиндрической оболочки; φ_0 - угол, который составляет касательная к нити с осью цилиндрической оболочки; $\theta_0 = \arcsin \frac{y_0}{R_0}$; y_0 - координата нейтральной поверхности при изгибе упругой цилиндрической оболочки, например, той же оболочки, у которой связующее отверждено; u_1 и u_2 - перемещения соответственно точек A и B вдоль касательных к нити (рисунок 2). При этом перемещениям точек нити препятствуют силы трения, которые направлены по касательной к нитям. Необходимо определить перемещения и напряжения в этой нити после установления равновесия.

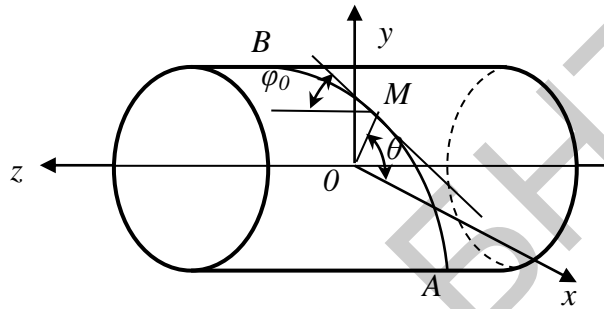


Рисунок 2 – Расположение системы координат относительно цилиндрической оболочки

Рассмотрено равновесие элемента препрега, состоящего из одного семейства нитей длиной ds , шириной b и толщиной h_1 (рисунок 3).

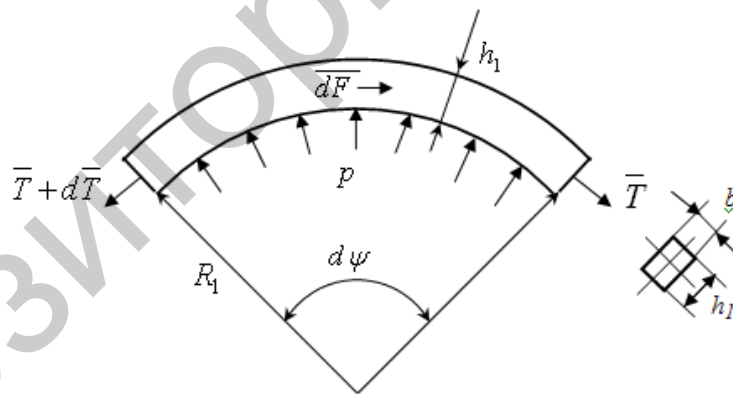


Рисунок 3 – Схема равновесия семейства нитей препрега

С учетом полученных зависимостей

$$T = \sigma h_1 \cdot b, \quad dT = d\sigma h_1 \cdot b, \quad dF = \tau \cdot bds,$$

$$\frac{du}{ds} = \frac{\sigma}{E'}$$

имеем уравнения равновесия в напряжениях и перемещениях:

$$\frac{d\sigma}{ds} - \frac{\tau}{h_1} = 0, \quad \frac{d^2u}{ds^2} - \frac{1}{h_1 E'} \tau = 0, \quad (5)$$

которые с учетом граничных условий (4) дают возможность найти решение поставленной задачи. Здесь τ – сила трения, определяемая зависимостями (2) или (3).

Для тканей гладкого переплетения получено решение уравнений (5) и найдены перемещения и напряжения в нитях i -го слоя, которые представимы в виде

$$u_{i0} = \frac{R_0}{E \sin \varphi_0} \sum_{j=1}^i c_{j0} + \sum_{k=1}^{i-1} c_{j0} \frac{m_1 \theta^k}{k} e^{m\theta} d\theta + c_{i1},$$

$$\sigma_{i0} = e^{m\theta} \sum_{j=1}^i c_{j0} + \sum_{k=1}^{i-1} c_{j0} \frac{m_1 \theta^k}{k}.$$
(6)

Удовлетворение граничным условиям (4) позволяет найти

$$c_{i1} = u_2, \quad c_{i0} = \frac{m E \sin \varphi_0}{2 R_0 \operatorname{sh} \frac{m\pi}{2}} u_2 - u_1 - D_i,$$

$$m = \frac{a R_0}{h_1 \sin \varphi_0}, \quad m_1 = \frac{a - k R_0}{h_1 \sin \varphi_0},$$

$$D_i = \frac{R_0}{E \sin \varphi_0} \sum_{j=1}^{\frac{\pi}{2}} c_{j0} + \sum_{k=1}^{i-1} c_{j0} \frac{m_1 \theta^k}{k} e^{m\theta} d\theta.$$
(7)

Рекуррентными соотношениями (6) и (7) необходимо руководствоваться, начиная с $i = 2, 3 \dots, n$, где n – количество слоев ткани, используемых для расчета торовых оболочек; θ – угловая координата точек нити AB ; в рассматриваемых суммах верхний индекс должен быть больше или равен нижнему, в противном случае сумма равна нулю. Для $i = 1$

$$\sigma_1 = c_{10} e^{m\theta}, \quad u_{10} = \frac{c_{10} R_0}{m E \sin \varphi_0} e^{m\theta} + c_{11},$$

где

$$c_{10} = \frac{m E \sin \varphi_0}{2 R_0 \operatorname{sh} \frac{m\pi}{2}} u_1 - u_2, \quad c_{11} = \frac{1}{2 \operatorname{sh} \frac{m\pi}{2}} u_1 e^{\frac{m\pi}{2}} - u_2 e^{-\frac{m\pi}{2}}.$$

Показано, что для качественного изготовления оболочки тора должны обязательно выполняться условия

$$\sigma_i|_{\theta=-\frac{\pi}{2}} \geq \sigma_{01}, \quad \sigma_i|_{\theta=\frac{\pi}{2}} \leq k \cdot \sigma_{02}.$$
(8)

Здесь σ_{01} – минимальные напряжения в точке нити, обеспечивающие сдвиг нити со смещением; σ_{02} – напряжение, характеризующее прочность ткани на разрыв; $k \cdot \sigma_{02}$ – максимальная доля технологического натяжения армирующего материала; коэффициент k определяется экспериментально для каждого вида ткани.

Третья глава посвящена разработке методик проведения испытаний для определения тех характеристик препрега, которые используются в расчетных

формулах, установленных в предыдущей главе. Таким образом, разработаны: методики испытаний для определения коэффициентов внутреннего трения μ_1 , μ_2 , k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} ; τ_1^0 , τ_2^0 - предельных значений внутреннего трения нитей у биаксиальной ткани; коэффициентов m_1 и m_2 – максимального и минимального относительных неупругих удлинений при растяжении и сжатии тканого армирующего материала соответственно в поперечном и продольном направлениях к полотну ткани.

Для определения перечисленных величин предложено проводить соответствующие испытания и затем, путем сравнивая нагрузок и перемещений, полученных экспериментально и вычисленных аналитически, определять искомые значения коэффициентов. Все приборы, которые использовались при проведении испытаний, прошли государственную поверку в установленном порядке.

Для нахождения коэффициентов внутреннего трения предложено проводить испытание, которое заключается в вытягивании перерезанной на расстоянии $s = s_0$ нити. Здесь s_0 – варьируемая длина нити (при испытаниях $s_0=100\text{мм}$; 200мм ; 250мм ; 400мм). К концу такой нити прикладывается сила, нить при этом сдвигается со смещением. Максимальное значение нагрузки фиксируется. Препрег состоит из трех слоев тканого материала. Перерезанная нить находится в среднем слое ткани. Образец сдавлен вертикальной нагрузкой интенсивностью p и растянут поперечными усилиями q .

Были проведены испытания полосок ткани Т-13, угольной ткани 56313 и биаксиальной ткани ВХ-470 для разных длин нитей s_0 , давления p и усилий q . Каждый вид испытаний повторялся 5 раз. Разброс результатов испытаний от среднего значения составил не более 10 %. В таблице 1 приведены результаты расчетов, которые были получены путем сравнения результатов испытаний с соответствующими аналитическими зависимостями, выражающими уравнения равновесия.

Таблица 1– Таблица значений коэффициентов трения

	σ_{00} , МПа	p_{01} , МПа	k_{11} , б/р	k_{12} , б/р	μ_1 , б/р
Ткань Т-13					
основа	7,33	0,00183	0,000646	0,0161	16,102
уток	4,11	0,00140	0,000468	0,0140	8,31
Угольная ткань					
	0,324	0,00248	0,00147	0,00038	0,255
Биаксиальная ткань					
	1,05	0,00649	-	-	1,402

Напряжение σ_{00} обозначает значение напряжения σ_{01} при $p = p_{01}$, $q = 0$. Давление p_{01} является минимальным давлением для p и имеет смысл внутреннего давления, которое сформировалось при ткачестве ткани. При отсутствии такого давления ткань не могла бы существовать как единое целое. Она распалась бы на отдельные элементы – нити. Симметричность структур угольной и биаксиальной тканей (условия переплетения, толщина нитей и их количество) дают основание считать, что рассматриваемые характеристики одинаковы для

каждого из двух семейств нитей у каждой ткани. Это было подтверждено экспериментом [1]. На этом основании в таблице для указанных тканей приведены только характеристики одного направления.

Необходимость определять экспериментальным путем максимальные величины относительных неупругих деформаций цилиндрической оболочки при ее изгибе установлена в главе 2. Для имитации таких деформаций разработан прибор, который представляет собой четырехзвенник в виде ромба. Образец ткани в общем виде в виде ромба и, в частности, в виде квадрата со сторонами параллельными семействам нитей защемляется по сторонам четырехзвенника. Нагрузка прикладывается к противоположным углам четырехзвенника. На рисунке 4 представлена фотография этого прибора с закрепленным в нем образцом ткани в момент нагружения.

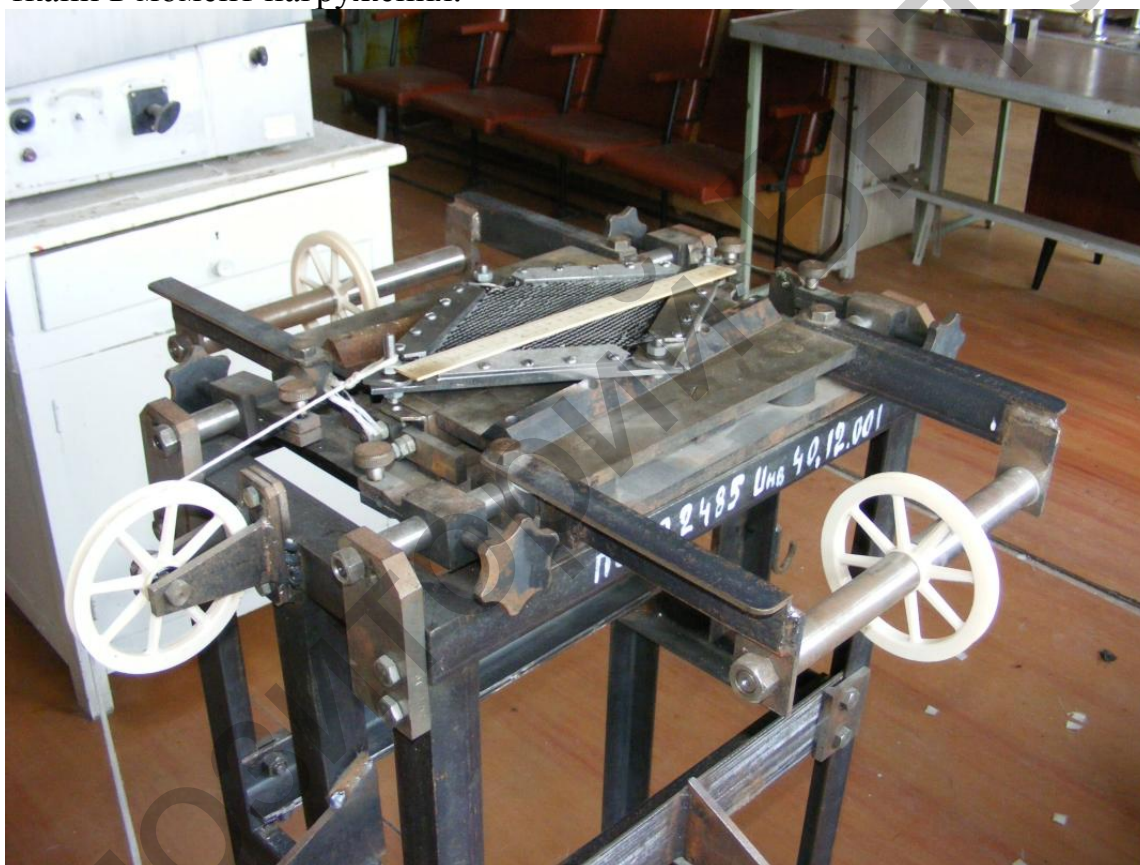


Рисунок 4 – Фотография образца в момент нагружения

При испытаниях образец удлиняется в направлении действия силы и укорачивается в перпендикулярном направлении, оставаясь все время ромбом. В результате уменьшается расстояние между параллельными сторонами ромба, что приводит к сжатию семейств нитей. Фиксируется усилие P , приложенное к рамке четырехзвенника и перемещение ΔW , которое равносильно изменению длины диагонали ромба. Вырезается образец со стороной равной $l = 140$ мм, стороны такого образца параллельны соответствующим семействам нитей.

В условиях поставленной задачи о сжатии армирующего материала само сжатие осуществляется следующим образом. Происходят геометрические изменения параметров сечения нитей до установления тех размеров, которые обеспечивают целостность ее формы независимо от величины приложенной внешней нагрузки. Одновременно происходит параллельный сдвиг нитей, уменьшая расстояние между ними. Таким образом, рассматриваемое сжатие

можно трактовать как процесс, осуществление которого происходит в два этапа. На первом этапе «недоуплотненная» нить получает «нормальное уплотнение». В этом случае сечение нити уменьшается за счет более компактного расположения в сечении элементарных нитей. Второй этап сжатия характеризуется только упругими деформациями. В какой-то мере упругий этап сжатия семейства нитей похож на сжатие упругого твердого тела.

Геометрическая интерпретация сделанных предположений представлена на рисунке 5.

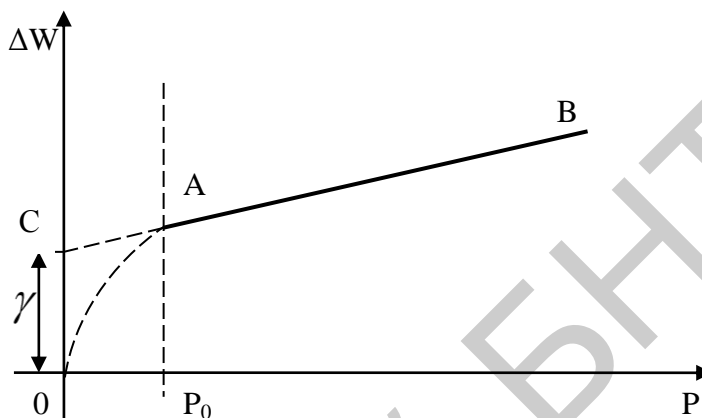


Рисунок 5 – Зависимость деформативности ткани от нагрузки

Здесь на участке OA графика деформация ткани осуществляется за счет неупругих перемещений при изменении параметров сечения нитей. Препятствием к таким изменениям являются силы трения. На участке AB перемещения осуществляются только за счет упругой деформации нитей ткани при сжатии. Очевидно, уменьшение или увеличение сил трения никак не может сказаться на величине неупругих деформаций, так как неупругие деформации — чисто геометрическая величина, характеризующая степень уплотнения препрегов армирующим материалом. Уменьшение сил трения приводит к изменению участка неупругих деформаций в сторону уменьшения. Графически такое изменение приводит к сближению точек A и C. Таким образом, величина γ , показанная на рисунке 5 представляет собой неупругую составляющую и не зависит от изменения внутренних сил трения для одной и той же ткани. На этом основании можно руководствоваться построением линейных зависимостей между деформациями и напряжениями.

Предполагаем линейную зависимость перемещения ΔW от нагрузки P . Таким образом

$$\Delta W = \gamma + \gamma_1 P, \quad (9)$$

где γ и γ_1 — некоторые постоянные, подлежащие определению. Найдем их методом наименьших квадратов с использованием результатов проведенных испытаний. Результаты испытаний для ткани Т-13 представлены на диаграмме рисунка 6. На рисунке обозначения: \blacklozenge , ..., \blacksquare представляют собой точки с координатами $P_i, \Delta W_{ij}$.

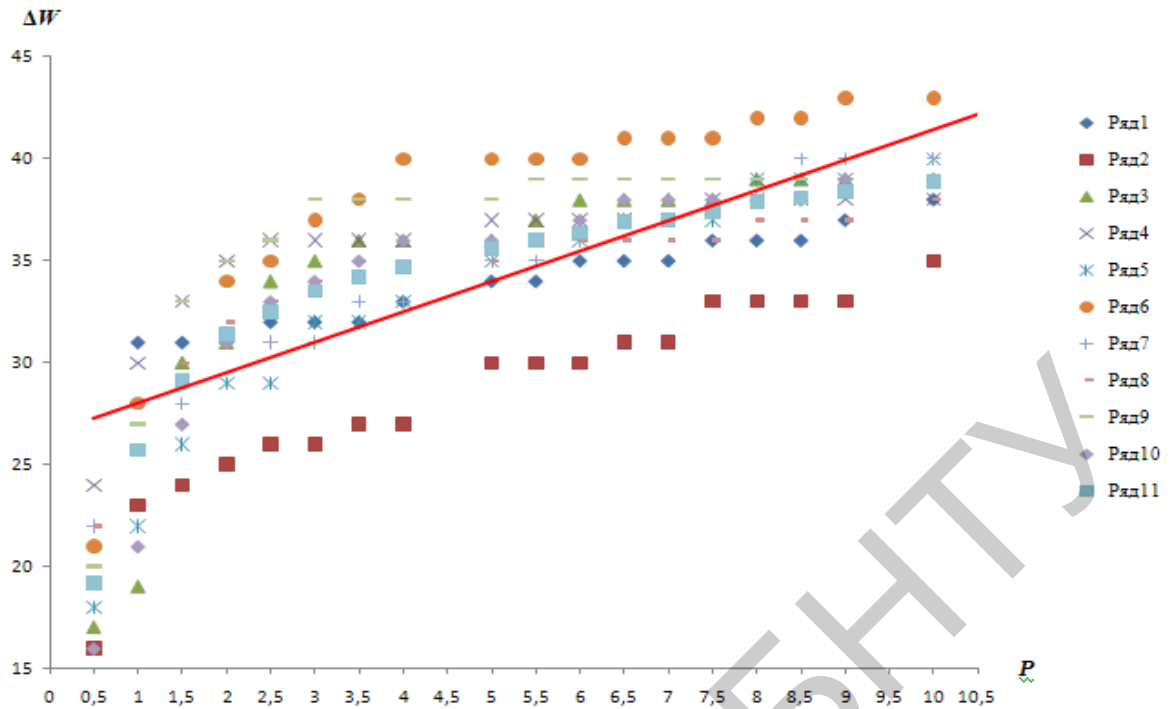


Рисунок 6 – Диаграмма зависимости перемещения ΔW при испытаниях ткани Т-13 от нагрузки P

Четвертая глава посвящена установлению практических рекомендаций по изготовлению торковых оболочек из композиционных материалов. Отмечено, что задача, поставленная в работе, сводится не к установлению всех технологических параметров, а только тех, которые должны быть определены и могут влиять на качество при намотке именно торковых конструкций, точнее, тех параметров, которые изменяются в процессе изгиба оболочки. Корректировка этих параметров в исходном состоянии должна производиться с целью восстановления их оптимального влияния на качественные и количественные стороны режима формования для получения проектной структуры композиционного материала. Показано, что при изгибе оболочки в количественном отношении изменяются следующие величины: время изготовления изделия в сторону увеличения; натяжение в нитях армирующего материала; давление формующего материала на оправку; степень наноса связующего на армирующий материал. Все это в конечном итоге приводит к появлению сжимающих напряжений в нитях как в продольном, так и в поперечном направлениях в плоскости ткани. Такие сжатия могут привести к потере устойчивости армирующего материала, а следовательно, к образованию в нем складок, расслоений и других неприятностей, влияющих на качество изготовления торковой оболочки. Отмечено, что управление величинами сжимающих напряжений можно проводить путем изменения положения нейтральной поверхности упругой цилиндрической оболочки, идентичной оболочке из препрега, при ее изгибе, т. е. величиной параметра y_0 .

В этом случае если торковая оболочка получена при условии перпендикулярности торцевых сечений всем образующим, то верхняя и нижняя образующие должны получить удлинения, равные

$$\Delta l_1 = l \cdot \frac{R_0 - y_0}{R + y_0}, \quad \Delta l_2 = -l \cdot \frac{R_0 + y_0}{R + y_0}, \quad (10)$$

где l – длина цилиндрической оболочки; R_0 – радиус цилиндрической оболочки; R – радиус кривизны изгиба оси цилиндрической оболочки; Δl_1 и Δl_2 – удлинение верхней и нижней образующих цилиндрической оболочки при ее изгибе в торовую.

Выполнение условий (10) дает возможность закрепить торцы цилиндрической оболочки уже трансформированной в торовую с последующим отверждением связующего.

Установлено, что другим, не менее важным фактором, влияющим на качество изготовления торовой оболочки, является величина силы внутреннего трения. Причем, чем меньше сила трения, тем больше возможность расширения диапазона изменения конструктивных размеров, обеспечивающих возможность изготовления торовой оболочки. С целью возможности управления величиной силы трения проведены испытания по установлению ее зависимости от вязкости связующего, температуры переработки и от скорости деформирования. Испытания проводились на образцах ткани Т-13 размером 200 x 40 мм. Одна из нитей перерезалась на расстоянии 100 мм от края образца. Образцы пропитывались связующим при определенной вязкости. Перерезанная нить выдергивалась из образца на разрывной машине РН-3-1. При этом измерялась максимальная сила выдергивания. В результате экспериментов установлено:

1. Сила трения не зависит от вязкости связующего, если вязкость изменяется в пределах (1,1- 63) °Е. Вязкость μ измерялась в градусах Энглера на вискозиметре В246, Ø4 мм и рассчитывалась по формуле $\mu = t_{ж} t_{в}$, где $t_{ж}$ – время истечения связующего объемом $V=100 \text{ см}^3$; $t_{в} = 10,56 \text{ с}$ – время истечения дистиллированной воды (указано заводом-изготовителем).

2. Сила внутреннего трения для препрегов не зависит от температуры переработки, если она находится в пределах (24–90)°С.

3. Сила трения зависит от скорости вытягивания нитей из препрега, причем чем меньше скорость вытягивания, тем меньше силы трения. График зависимости силы трения от скорости вытягивания показан на рисунке 7.

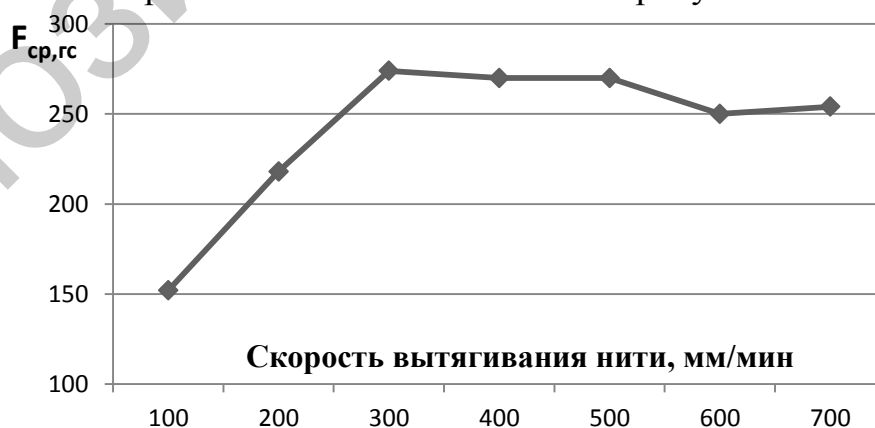


Рисунок 7 – График зависимости силы трения от скорости вытягивания нити

Отсюда следует рекомендация. Изгиб цилиндрической оболочки для превращения ее в торовую необходимо производить при скорости изменения длин верхней и нижней образующих не больше 300 мм/мин. При этом необходимо запланировать несколько кратковременных остановок, позволяющих материалу препрега полностью осуществлять «запоздалые деформации». Такая ползу-

честь материала происходит из-за его микроструктурной неоднородности. Например, для диаметра цилиндрической оболочки 1400 мм рекомендованы три технологические остановки на 5 минут в равных временных промежутках между ними.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана механико-математическая модель расчета напряженно-деформированного состояния торových оболочек, изготавливаемых из гетерогенных полимерных материалов, к числу которых относятся препреги. Модель учитывает физико-механические свойства препрегов, особенности структуры строения тканей, температуру переработки, вязкость связующего, скорость деформирования армирующего материала, что позволило адекватно описать реально происходящие процессы при формировании торových оболочек [3, 4, 5, 12].

2. Определены оптимальные условия управления технологическими параметрами для формирования торových оболочек из цилиндрических препрегов. Основным условием является управление напряженно-деформированным состоянием препрега в процессе изготовления оболочки. Для качественного формирования торových оболочек, исключающего образования складок (гофр), не рекомендуется допускать сжатия армирующего материала не только в продольном направлении к нитям, но и упругого сжатия в плоскости ткани в поперечном направлении к ним. Для выполнения указанных условий установлены диапазоны изменения напряжений и перемещений в нитях армирующего материала [1, 6, 7, 9, 11, 12].

3. Установлены зависимости силы трения армирующего элемента торových оболочек от скорости деформирования полимерных материалов, напряжений и перемещений в нитях тканого материала. Доказано, что сила трения не зависит от вязкости связующего в диапазоне (1,1 – 63) °Е и температуры переработки в пределах (24–90) °С. Оптимальной скоростью деформации при формировании торовой оболочки из цилиндрической является 300 мм/мин. Достоверность полученных результатов подтверждена на основе проведенных экспериментальных исследований и внедрения их в технологию изготовления торových оболочек [1].

4. Впервые получены дифференциальные уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние в армирующем материале торových оболочек. Для их решения разработан метод определения деформационных характеристик арматуры препрега. Получены формулы для расчета перемещений концов типового элемента нити в виде половины витка спирали с началом в нижней точке цилиндрической оболочки и концом – в верхней. Метод основан на результате экспериментальных исследований деформаций двух типов идентичных цилиндрических оболочек, материал которых в одном случае обладает свойствами препрега, в другом – упругого тела [4].

5. Показано, что к определяющим внутренним силовым факторам, возникающим в изделиях из препрегов при действии внешней нагрузки, относятся:

растягивающие усилия в нитях, усилия сжатия нитей в поперечном направлении, сила трения скольжения при смещении нитей одного семейства по нитям второго. Установлены функциональные зависимости силы трения от напряжений в нитях и величины давления между слоями ткани. Разработаны методики проведения экспериментальных исследований для определения коэффициентов, входящих в эти зависимости, для тканей гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей и неупругой составляющей при сжатии препрегов. Проведены испытания и определены коэффициенты трения и максимальные значения неупругого относительного сжатия для стеклоткани Т-13, угольной ткани 56313 и биаксиальной ткани ВХ-470 [1, 2, 8, 10, 11, 15].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанная модель расчета напряженно-деформированного состояния в препрегах может быть использована для конструирования новых изделий на основе цилиндрических и других осесимметричных оболочек. Установленные зависимости между силой трения армирующих элементов и напряжениями в них являются основой для исследования прочностных и деформационных характеристик в создаваемых новых инженерно-технических изделиях.

Тканые материалы с успехом применяются для создания конструкций методом трансформации. Характеристика ткани под названием «драпируемость» отвечает за возможность облегания тканью поверхности двоякой кривизны без складок. В процессе облегания происходит деформация ткани, которая обеспечивается за счет сдвиговых деформаций и изменения углов между нитями основы и утка. Эти деформации практически ничем не отличаются от деформаций, имеющих место при формовании торовых оболочек на гибких оправках. На этом основании может быть успешным применение настоящей теории с учетом особенностей применяемого материала для укладки ткани на поверхность двоякой кривизны [13, 14].

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

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

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

1. 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.

2. 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.

3. 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.

Статьи в других научных изданиях

4. Моделирование процесса изготовления торовой оболочки из цилиндрического состояния препрега / В.М. Сахоненко, К.Г. Скворцов, Д.А. Федотов, К.А. Горелый // *Тенденции развития современной науки: сб. научных статей*. – Волоколамск. – 2011. – С. 30 – 34.

5. 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.

6. Постоянные слагаемые закона Гука / В.М. Сахоненко, К.Г. Скворцов, Д.А. Федотов, К.А. Горелый // *Тенденции развития современной науки: сб. научных статей*. – Волоколамск. – 2011. – С. 35 – 40.

7. 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. – С. 97 – 102.

8. 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. – С. 309 – 314.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Использование свойств тканых материалов при укладке их на выпуклые поверхности / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.В. Горелый, Е.В. Малютин // Механика-2011: сб. науч. тр. 5-го Междунар. конгр. по теор. и прикл. механике. – Минск, 2011. – С. 472 – 476.

Патент

15. 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.

Финит

Репозиторий БНТУ

РЭЗІЮМЭ

Гарэлы Канстанцін Аляксандравіч

Мадэліраванне напружана-дэфармаванага стану у торавых абалонках, вырабляемых з гетэрагенных палімерных матэрыялаў

Ключавыя словы: напружана-дэфармаваны стан, перамяшчэнні, дэфармацыі, пругкасць, ураўненні раўнавагі, прэпрэг, кампазіцыйна-валакністы матэрыял, сямейства ніцяў, торавая абалонка.

Аб'ект і прадмет даследавання. Аб'ект даследавання - палімерна-валакністае кампазіцыйнае асяроддзе, якая знаходзіцца ў вадкам стане палімераў, г.зн. ў стане прэпрэга. Прадмет даследавання – пабудова механічнай мадэлі асяроддзя, якая апісвае паводзіны кампазітаў пры іх дэфармаванні ва ўмовах вязкага стану палімераў.

Мэта і вынікі даследавання. Стварэнне неабходных для даследавання элементаў механіка-матэматычнай мадэлі і вывучэнне працэсаў, якія адбываюцца ў прэпрэгах пры фармаванні торавых абалонак для знаходжання спосабаў кіравання тэхналагічнымі параметрамі пры ўмове забеспячэння патрабаванняў канструктарскай дакументацыі па якасці.

У адпаведнасці з гэтай мэтай у рабоце былі вырашаны задачы:

1. Атрыманы матэматычныя формулы для разліку кампанентаў сілы трэння паміж ніцямі сямействаў тканін гладкага перапляцення і біаксіальнай тканіны.

2. Вырашана важная ў практычным дачыненні задача аб знаходжанні ўмоў кіравання тэхналагічнымі параметрамі для якаснага фармавання торавых абалонак з цыліндрычных прэпрэгаў.

3. Распрацаваны праграмы і метадыкі па вызначэнні каэфіцыентаў унутранага трэння. Праведзены выпрабаванні і вызначаны каэфіцыенты ўнутранага трэння для шклотканіны Т-13, вугальнай тканіны 56313 і біаксіальнай тканіны ВХ-470.

4. Атрыманы разліковыя формулы, якія апісваюць няпругкі адносны сціск сямействаў ніцяў у тканін гладкага перапляцення і ў біаксіальных тканін. Распрацаваны метады і спосабы па ўсталяванні няпругкага адноснага сціску тканін. Эксперыментальна ўстаноўлены максімальныя значэнні няпругкага адноснага сціску шклотканіны Т-13, вугальнай тканіны 56313 і біаксіальнай тканіны ВХ-470.

5. Знойдзены спосабы і распрацаваны метады вызначэння залежнасці сілы трэння ад вязкасці сувязнага, тэмпературы прэпрэга і хуткасці дэфармавання прэпрэга. Для пацверджання зробленых асноўных высноў праведзены адпаведныя выпрабаванні.

РЕЗЮМЕ

Горелый Константин Александрович

Моделирование напряженно-деформированного состояния в торových оболочках, изготавливаемых из гетерогенных полимерных 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 – полимерно-волоконистая композиционная среда, находящаяся в неотвержденном состоянии полимеров, т. е. в состоянии препрега. Предмет исследования – построение механической модели среды, описывающей поведение композитов при их деформировании в условиях вязкого состояния полимеров.

Цель и результаты исследования. Создание необходимых для исследования элементов механико-математической модели и изучение процессов, происходящих в препрегах при формовании торových оболочек для нахождения способов управления технологическими параметрами при условии обеспечения требований конструкторской документации по качеству.

В соответствии с этой целью в работе были решены следующие задачи.

1. Получены математические формулы для расчета компонентов силы трения между нитями семейств тканей гладкого переплетения и биаксиальной ткани.

2. Решена важная в практическом отношении задача о нахождении условий управления технологическими параметрами для качественного формования торových оболочек из цилиндрических препрегов.

3. Разработаны программы и методики по определению коэффициентов внутреннего трения. Проведены испытания и определены коэффициенты внутреннего трения для стеклоткани Т-13, угольной ткани 56313 и биаксиальной ткани ВХ-470.

4. Получены расчетные формулы, описывающие неупругое относительное сжатие семейств нитей у тканей гладкого переплетения и у биаксиальных тканей. Разработаны методы и способы по установлению неупругого относительного сжатия тканей. Экспериментально установлены максимальные значения неупругого относительного сжатия стеклоткани Т-13, угольной ткани 56313 и биаксиальной ткани ВХ-470.

5. Найдены способы и разработаны методы определения зависимости силы трения от вязкости связующего, температуры препрега и от скорости деформирования препрега. Для подтверждения сделанных основных выводов проведены соответствующие испытания.

SUMMARY

Konstantin Gorely

The deflected mode modeling in torus shells made of heterogeneous polymer materials

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

The object and the subject of study. The object is a polymer-fiber composite material in the uncured state of polymers, i.e. a prepreg. The subject is the construction of a mechanical model of the agent, which describes the behavior of the composites during deformation in a viscous state of polymers.

The objective and results of the work. The creation of necessary elements for studying of mechanical and mathematical model and the analysis of the processes occurring in the prepreg during torus shells molding to find the ways to control process parameters in conditions to conform the requirements of the design documentation for quality.

In accordance with this objective the following problems were resolved.

1. The mathematical formulas for calculating the components of the friction force between the threads of the families of smooth and biaxial fabrics are obtained.

2. The important for the practice problem of finding the conditions of the technological parameters for forming high-quality torus shells from cylindrical prepreps is solved.

3. The programs and methods to determine the coefficients of internal friction are developed. The experiments were performed and the coefficients of the internal friction for the fiber glass T-13, carbon fabric 56313 and biaxial fabric BX-470 are determined.

4. The calculation formulas describing the inelastic relative compression of thread families for smooth and biaxial fabrics are obtained. The methods to determine the inelastic relative compression in textile are developed. The maximum values of the inelastic relative compression for fiberglass T-13, carbon fabric 56313 and biaxial fabric BX-470 are obtained experimentally.

5. The methods of determination of the friction force dependence on the viscosity of the binder, the temperature of the prepreg and the prepreg deformation speed are found. To confirm the main conclusions the appropriate experiments were performed.