

МЕХАНИКА ПРЕПРЕГОВ –
РАСЧЕТ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АРМИРОВАННЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В 2 частях

Часть 1

МИНСК
БНТУ
2016

УДК 620.22-419.8: 539.3

Авторы:

Ю.В. Василевич, К.А. Горелый, В.М. Сахоненко,
С.В. Сахоненко, Е.В. Малютин

Под редакцией Василевича Ю.В., д-ра физ.-мат. наук, профессора

Механика препрегов – расчет изделий из армированных композиционных материалов: в 2 ч. Ч. 1 / Ю.В. Василевич [и др.]; под ред. Ю.В. Василевича. – Минск: БНТУ, 2016. – 295 с. – ISBN 978-985-550-907-4 (Ч. 1).

Изложены научные результаты теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации технических и технологических аспектов производства инженерных объектов из армированных композиционных материалов. Основное внимание уделено прочностным и деформационным характеристикам препрегов, т.е. полимерно-волонистой композиционной среде, находящейся в неотвержденном состоянии полимеров, используемым на важнейшем этапе производства качественных изделий из композита.

Для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов, магистров, студентов университетов, занимающихся решением проблем по созданию изделий из композита.

Рекомендовано к изданию
научно-техническим советом Белорусского
национального технического университета
(протокол № 7 от 28.09.2016 г.)

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная математика и программирование» Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины *В.В. Можаровский*;
канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика № 3» Белорусского национального технического университета *В.А. Акимов*

ISBN 978-985-550-907-4 (Ч. 1)
ISBN 978-985-550-909-8

© Белорусский национальный
технический университет

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	6
Глава 1. Основные принципы разработки технологических параметров при проектировании изделий из композиционных материалов.....	9
1.1. Композиты.....	9
1.2. Полимерное связующее.....	13
1.3. Структурная организация тканых наполнителей для композиционных материалов.....	21
1.4. Ткани гладкого переплетения и их характеристики.....	25
1.5. Мультиаксиальные ткани.....	31
1.6. Препреги.....	36
1.7. Основные свойства препрегов и их использование в технологических процессах изготовления изделий из композиционных материалов.....	38
1.8. Основные принципы создания высокопрочных ориентированных стеклопластиков.....	45
1.9. Упругие прочностные свойства ориентированных стеклопластиков.....	53
1.10. Анизотропия свойств материала композита и ее регулирование.....	56
1.11. Свойства конструкционных материалов в условиях эксплуатации.....	59
1.12. Адгезионные свойства композитов.....	60
1.13. Оптимизация технических и технологических параметров – основа создания качественных изделий из композита.....	65
1.14. Обеспечение жизнеспособности связующего при изготовлении изделий из армированных пластиков.....	68
1.15. Зависимость силы внутреннего трения от технологических параметров при изготовлении изделий из композиционных материалов.....	76
1.16. Технологии формования силового набора.....	85
1.17. Усадка и коробление.....	99
1.18. Классификация и характеристики стеклопластиков.....	106
Литература.....	115

Глава 2. Упругое и неупругое состояние пропитанных тканей (препрегов).....	129
2.1. Введение	129
2.2. Упругая ортотропия однонаправленного резинокордного монослоя и композитов на его основе.....	133
2.3. Математическая модель тканого материала гладкого переплетения	138
2.4. Перекрестно-армированные слоистые резинокордные композиты	141
2.5. Слоистый резинокордный композит с промежуточным резиновым слоем	146
2.6. Неупругое состояние тканей гладкого переплетения	151
2.7. Многоволоконные нити и их влияние на строение ткани	153
2.8. Зависимость между напряжениями и деформациями при растяжении тканого материала препрега	159
2.9. Установление закономерностей поведения тканей при сжатии	164
2.10. Уравнения равновесия структурной ячейки ткани при плоском напряженном состоянии препрегов.....	171
2.11. Моделирование деформации ячейки препрега при сжатии его в направлении ортогональном к направлению растяжения.....	176
2.12. Законы трения в условиях формования стеклопластиковых оболочек	180
2.13. Количественная оценка сил трения в препрегах, армированных тканями гладкого переплетения.....	184
2.13.1. Трение в узлах переплетения нитей, расположенных перпендикулярно друг к другу.....	184
2.13.2. Трение между неперпендикулярно ориентированными нитями	190
2.14. Трение в препрегах, армированных мультиаксиальными тканями	193
Литература.....	197
Глава 3. Методы проведения испытаний для оценки механических свойств армированных препрегов.....	201
3.1. Требования к методикам испытаний препрегов.....	201
3.2. Расчетные обоснования методик испытания препрегов	205

3.3. Постоянные упругости и относительные необратимые удлинения при растяжении.....	210
3.4. Коэффициенты трения у препрегов из тканей гладкого переплетения.....	213
3.5. Результаты испытаний и расчетов по ним для тканей гладкого переплетения.....	223
3.6. Методика нахождения напряжения в нити	228
3.7. Коэффициенты трения у препрегов из мультиаксиальных тканей.....	234
3.8. Теоретические и экспериментальные исследования по определению неупругой составляющей при сжатии ткани.....	240
3.9. Влияние перекоса и эксцентриситета закрепления ткани в раме при испытании ее на сдвиг.....	250
3.10. Оценка податливости препрегов при сжатии	259
3.11. Модель деформирования косоугольных тканей из растяжимых нитей	267
3.12. Моделирование деформаций из нерастяжимых нитей	278
3.13. Анализ предельно допустимых диапазонов возможных деформаций ортогонально армированных тканей	284
Литература.....	294

ПРЕДИСЛОВИЕ

Полимерно-волоконистая композиционная среда, находящаяся в не отвержденном состоянии полимеров, т.е. в состоянии препрега, является объектом исследования в данной книге. Одно из основных свойств препрегов – это возможность неупругого сдвига со скольжением между собой нитей армирующего материала при нагружении. Препреги настолько податливы, что позволяют проводить с ним всевозможную переработку. В результате уже сформированное изделие может приобрести новые формы с изменением размеров. В некоторых случаях появляется возможность упростить оснастку, уменьшить время изготовления изделия, повысить его качество и прочностные свойства. Достоинством практического использования препрегов является формование изделий на гибких оправках (других приспособлениях), например, путем изгиба из цилиндрической оболочки можно получить торовую; в производственных условиях в процессе трансформации пропитанных связующим тканых материалов изготовить шпангоуты сложной формы и многие другие изделия с заданными геометрическими и прочностными характеристиками. Описанные возможности использования на практике гетерогенных полимерных материалов реализованы в ОАО «Авангард» при изготовлении оболочек, трубопроводов, шпангоутов и многих других изделий. Процесс трансформации препрега в изделие является важнейшим этапом изготовления инженерных элементов и объектов из композитов.

Книга состоит из девяти взаимосвязанных глав. В конце каждой главы содержится список цитируемой литературы. Первая глава носит вводную направленность в область исследования композиционных материалов. Дано описание основных высокомодульных волокон и нитей, структурной организации тканых наполнителей, свойств препрегов и их использования в технологических процессах изготовления изделий, принципов создания высокопрочных ориентированных стеклопластиков; изложены требования к полимерным связующим. Обсуждаются результаты исследования по оценке установленной зависимости силы внутреннего трения от свойств армирующего материала препрега, схемы армирования, вязкости связующего, температуры переработки, скорости деформирования. Исследованы усадка и коробление композиционного материала;

даны рекомендации по избежанию указанных негативных явлений. Приведен перечень нормативных документов по определению физико-механических показателей композитов.

Во второй главе изложены результаты исследований по изучению упругого и неупругого состояний пропитанных связующим тканей (препрегов). Описаны случаи возникновения этих состояний. Разработана математическая модель по расчету напряженно-деформированного состояния однонаправленного резино-кордного монослоя и композитов на его основе. Установлена зависимость между напряжениями и деформациями при растяжении тканого материала препрега. Описаны закономерности поведения тканей при сжатии. Выведены уравнения равновесия структурной ячейки ткани при плоском напряженном состоянии препрегов. Осуществлено моделирование деформации ячейки препрега при сжатии его в направлении ортогональном к направлению растяжения.

В третьей главе изложены методы испытаний для оценки механических свойств армированных препрегов; содержатся требования к методикам проведения испытаний, освещены другие сопутствующие вопросы. Установлено влияние перекоса и эксцентриситета закрепления ткани в рамке на результат испытаний на сдвиг. Дан анализ предельно допустимых диапазонов возможных деформаций ортогонально армированных тканей.

В четвертой главе разработана теория плоского деформированного состояния препрегов в условиях статического равновесия. Выведены уравнения равновесия при плоском напряженном состоянии препрегов; выполнен расчет потенциальной энергии деформации. Доказаны единственность и существование решения краевых задач для препрегов. Разработанная теория использована для расчета напряжений в нитях препрега при проколе круглых отверстий.

Теоретические основы формования торových оболочек на гибких оправках описаны в пятой главе. Содержание главы изложено в следующих разделах: стадии формования торových оболочек; требования, предъявляемые к связующим и наполнителям препрегов; управление критериями качества при формовании торových оболочек из препрегов; влияние натяжения в нитях на монолитность композиционного материала; трансформация цилиндрической оболочки-заготовки в торовую с использованием спиральной намотки нитью или жгутом.

Изготовление интегральных подкрепленных оболочечных конструкций и шпангоутов из препрегов описано в шестой главе. Дана методика расчета параметров трансформации при изготовлении шпангоутов из косоугольно армированных тканей.

Седьмая глава посвящена описанию разработанной математической модели по укладке тканой заготовки на выпуклые поверхности. Решение такой задачи продиктовано необходимостью укладки ткани на выпуклые поверхности без образования гофр, складок и др. недостатков. Выполнен пример укладки квадратного образца ткани на сферическую поверхность.

В восьмой главе изложено математическое моделирование по преобразованию спирально армированной неотвержденной цилиндрической заготовки в форму пространственного трубопровода. Приведен пример трансформации элементов цилиндрической трубы в винтовую поверхность. Результаты моделирования являются основой практической реализации проектных решений при изготовлении изделий. Приведены необходимые ссылки на цитируемую научно-техническую литературу.

В девятой главе рассмотрены важные научно-технические проблемы по ликвидации нежелательных остаточных напряжений в изделиях, изготовленных из композитных материалов. Изложены методические аспекты расчета остаточных напряжений в намоточных элементах конструкций, приведены соответствующие расчетные формулы. Описаны методика определения остаточных напряжений в разрезанных шпангоутах; влияние технологических параметров намотки цилиндрических изделий на остаточные напряжения; методы экспериментального исследования остаточных напряжений. Результаты исследований представляют ценную информацию об остаточных напряжениях, которые могут возникнуть в изделиях из композиционных материалов.

Теоретические и экспериментальные результаты выполненных исследований по моделированию и расчету прочностных и деформационных характеристик элементов изделий из полимерно-волоконистых материалов с неотвержденным связующим представляют важную информацию для разработчиков и изготовителей при организации последовательных оптимальных технических и технологических этапов производства объектов из композитов.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Композиты

Новые материалы, появление которых, как правило, определяется естественным стремлением повысить эффективность разрабатываемых конструкций, открывают возможности для реализации принципиально новых конструктивных решений и технологических процессов, а дальнейшее совершенствование конструкций и технологий ставит новые задачи перед материаловедением.

Современные композиционные материалы обладают не только широким спектром свойств, выгодно отличающих их от традиционных материалов, но и способностью к направленному изменению этих свойств в соответствии с назначением конструкции. Направленный характер свойств композитов одновременно означает, что наряду с высокими характеристиками в одних направлениях они могут обладать низкими в других. Однако правильный учет особенностей композитов и рациональное использование их преимуществ позволяет получать конструкции, обладающие высокой степенью весового совершенства и качественным уровнем свойств, недостижимых при использовании традиционных материалов.

Значительное место при исследовании полимерных материалов занимают способы их получения, которые осуществляются путем полимеризации полимеров. В каждом случае получение новых материалов с заданными свойствами, связано с целенаправленным регулированием свойств, которые достигаются путем отработки технологических режимов и процессов. Для целенаправленного регулирования свойств полимерных материалов используется целый ряд способов, позволяющих контролировать их на всех стадиях технологического процесса. В настоящее время достигнуты значительные успехи в создании композиционных материалов с желаемым комплексом свойств (повышенного качества, заданными физико-механическими и теплофизическими показателями, с высокой стабильностью и долговечностью).

Внимание специалистов многих стран мира все больше привлекают конструкционные материалы в виде ориентированных волокнистых композитов. Предназначены они для изготовления основных и вспомогательных несущих элементов конструкций. Для этого имеется возможность выбора их из целого ряда типов волокнистых структур, получаемых различными текстильными методами. Уникальное сочетание легкости, гибкости, высокой прочности и вязкости разрушения, характерное для текстильных армирующих структур, определило преимущество их применения для широкого спектра изделий – от крыльев самолета до углерод-углеродных носовых обтекателей. Значение текстильных конструкционных композитов все время повышается. Текстиля, используемые в качестве арматуры для композитов, проектируются с учетом многочисленных требований, включая стабильность размеров и способность к облеганию заданной формы. Однако, несмотря на то, что способы получения сложных текстильных структур найдены довольно давно, технология изготовления изделий из композитов на их основе развивается медленно, особенно на стадии переработки препрегов. Препреги – это полимерно-волокнистая композиционная среда, находящаяся в неотвержденном состоянии полимеров. Наблюдается отсутствие фундаментальных исследований по вопросам расчетов на прочность и жесткость текстильных каркасов применительно к конструкционным материалам. Отсутствует синтез знаний специалистов по текстильным материалам и по структурной механике.

Композиты можно охарактеризовать как определенную комбинацию разнородных материалов, обладающую специфической структурой и геометрической формой. При проектировании композита стараются реализовать наивысшие эксплуатационные характеристики материала, недостижимые при использовании каждого из компонентов в отдельности. Довольно часто удается получать композиты с уникальными структурами, формой и свойствами, которые значительно превосходят свойства компонентов.

Текстильные композиты можно определить, как комбинацию полимерного связующего с системой волокон или нитей, либо с тканью, полученной текстильными методами. Текстильные композиты могут быть гибкими (покрышки, надувные плоты, конвейерные ленты и т.п.) и жесткими. Многие системы волокнистых арми-

рованных пластиков являются жесткими текстильными композитами. Эти материалы появились в качестве заменителей металла и дерева. С тех пор волокнистые армированные пластики широко применяются для изготовления внешних и внутренних деталей кузовов автомобилей, фюзеляжей летательных аппаратов, корпусов судов, труб, мебели, элементов строительных конструкций, корпусов приборов и аппаратов, контейнеров бытовых приборов и т.п.

Непропитанные волокнистые материалы (волокно, нити или ткани), образующие определенную плоскую или пространственную структуру, называют текстильными армирующими каркасами. Текстильные каркасы различаются ориентацией волокон, видом переплетения и геометрическими параметрами. Строение текстильного каркаса может изменяться в широком диапазоне от простого плоского листа до сложной пространственной многонаправленной структуры. При проектировании текстильного конструкционного композита выбор исходных материалов и технологии получения композита должен соответствовать требованиям, предъявляемым к свойствам композита, производительности процесса и его стоимости. Спектр возможных технологических приемов чрезвычайно широк: от малопроизводительной, дорогостоящей ручной выкладки пакета слоев до скоростного, экономически эффективного непрерывного процесса формования. Изделия из текстильных конструкционных композитов можно либо отформовать в окончательных размерах, либо собрать из предварительно формованных элементов, либо, используя заготовку, довести до заданного профиля или размеров трансформацией препрегов либо механической обработкой. Из множества сочетаний текстильных материалов, полимерных связующих, конструкций армирования каркасов и методов их образования нельзя выбрать одно оптимальное, пригодное для всех возможных областей применения с точки зрения свойств, стоимости, доступности, технологичности, совместимости, надежности. Оптимальное сочетание компонентов, структуры и формы материала для каждой области применения можно найти только с позиций общего системного подхода.

Элементы конструкций из композиционных материалов, воспринимающие основные и второстепенные нагрузки, должны изготавливаться из высокомодульных волокон и нитей. С коммерческой

точки зрения к числу основных высокомодульных волокон относятся стеклянные, углеродные, органические, керамические и стальные волокна. Каждый из видов волокон обладает своими характерными преимуществами и недостатками по сравнению с другими. Например, углеродные волокна самые жесткие и упругие. Органические волокна хорошо сопротивляются разрыву, но плохо переносят сжимающие нагрузки. Стеклянные волокна самые дешевые и доступные, обладают наиболее высокой вязкостью разрушения, но не имеют прочности и жесткости, присущих другим волокнам.

Разнообразие типов волокнистых наполнителей и связующих, достаточно большой набор методов и приемов формования изделий позволяют обеспечить наиболее рациональный подход к выбору технологий и аппаратного оформления процессов производства: Альшильц, Цыплаков и др.[1,2–6]. Тем не менее, следует отметить и некоторые недостатки этих материалов: Тарнопольский и др.[1, 7–9]. К их числу относится значительное рассеяние физико-механических свойств, обусловленное структурной неоднородностью и недостаточной стабильностью процесса формования. Слоистость структур большинства стеклопластиков предопределила их слабое сопротивление межслойному сдвигу. Этот недостаток столь существен, что потребовалась разработка специальных методов механических испытаний, например, для оценки прочности при изгибе: Тарнопольский и др. [7]. Наличие воздушных или газовых включений, обусловленных существующей технологией формования, а также образование микротрещин в процессе производства и эксплуатации вызывают необходимость оценки герметичности конструкций, а также оценки изменения других свойств материалов в процессе эксплуатации.

Важнейшую роль в пластике играет характер и ориентация расположения наполнителя в матрице, приводящие к анизотропии свойств композита. Анизотропия стеклопластиков (конструктивная анизотропия) оказывается еще одним регулируемым параметром, дополнительной «степенью» свободы при конструировании полимерных материалов и конструкций на их основе. Другим преимуществом перед обычными изотропными материалами является эффективное управление анизотропией их механических, теплофизических и других свойств в плоскости армирования. Это дает дополнительные

резервы в повышении надежности конструкций, снижении их массы и расширении области применения. Управление анизотропией свойств осуществляется варьированием укладки арматуры.

Появляется возможность формировать свойства материала под конкретную деталь под ее напряженно-деформированное состояние, что обеспечивает повышение несущей способности изделия и приводит к существенному снижению его массы. При этом использование композиционного материала предоставляет возможность широкого выбора исходных компонентов и структурных схем армирования, технологических способов формообразования изделия и получения требуемой геометрии поверхности конструкции, что дает большую степень свободы разработчику при проектировании изделия.

1.2. Полимерное связующее

Связующее представляет собой двухкомпонентную или многокомпонентную систему, состоящую из синтетической смолы (полимерной или олигомерной составляющей) и отвердителей (или инициаторов и ускорителей отверждения); или включающую также пассивные и активные растворители (разбавители), пигменты и красители, пластификаторы, стабилизаторы и другие материалы, вводимые с целью придания связующим и стеклопластикам необходимых технологических и эксплуатационных свойств.

Основными требованиями, предъявляемыми к связующим в производстве стеклопластиков, являются высокая когезионная прочность, смачивающая способность и адгезия к поверхности стеклянного волокна, технологичность при переработке и малая объемная усадка при отверждении, низкая токсичность и невысокая стоимость. Кроме того, в зависимости от эксплуатационных требований к изделиям, могут возникать специфические требования к связующим, например, устойчивость к действию агрессивных сред, термостойкость и др. Выбор связующего определяется условиями изготовления и эксплуатации стеклопластиков.

Вопросам оценки свойств связующих посвящено большое число работ: Калининчев, Князев и др. [8, 9, 10–15]. Связующее придает композиционному материалу монолитность, способствует равно-

мерному распределению нагрузки между волокнами, защищает их от химических, атмосферных и других внешних воздействий и само воспринимает часть усилий, развивающихся в материале при работе под нагрузкой. Обширный перечень отечественных и зарубежных связующих с указанием их свойств и некоторых технологических особенностей переработки предоставляет разработчикам возможность выбора марки связующего, наиболее приемлемой для решения конкретных задач.

Основная роль полимерного связующего заключается в обеспечении монолитности материала и фиксации армирующих компонентов в заданном положении или ориентации. Производство большого количества изделий из неармированных полимеров свидетельствует, что полимерное связующее можно отвердить сложной пространственной формы, обладающей значительной структурной целостностью. Однако пространственная система из текстильных композитов сама по себе не обладает структурной целостностью, особенно при сжатии. Система из непропитанных полимером текстильных волокон может быть изготовлена различными способами: в виде мата из рубленых волокон, сборки из нитей, пакета тканых листов или плотной трехмерной тканой конструкции. Чтобы образовать непрерывную матрицу и придать жесткость армирующему каркасу связующее должно обладать хорошей проникающей способностью сквозь переплетения каркаса и смачивать поверхность волокон, образующих каркас. Следовательно, требования к величине вязкости полимерной системы зависят от структуры армирующего каркаса и используемого для пропитки технологического приема. В свою очередь поверхность волокон, контактирующих со связующим, должна иметь возможность быть смачиваемой и совмещаться с полимерной системой.

Пропитанный связующим армирующий текстильный каркас при формировании обычно подвергается действию значительного давления, позволяющего удалить пузырьки воздуха или технологического газа – носителя связующего. Для достижения высоких механических характеристик объемное соотношение армирующего каркаса и полимерной матрицы в текстильных композитах должно составлять примерно 70:30. Важно иметь способ удаления избытка связующего введенного при пропитке. После получения требуемой степени

пропитки полимерное связующее отверждается. Отверждение происходит при нормальной или повышенной температуре в одну или несколько стадий в зависимости от вида текстильного материала, типа связующего, способа изготовления композита, необходимой скорости отверждения, степени отверждения и требований к свойствам конечного продукта. Обычно глубокое отверждение полимерной системы в результате высокотемпературной обработки после отверждения увеличивает термостойкость матрицы и композита, однако при этом возрастает и их хрупкость.

Основным видом смол для изготовления текстильных композитов, от которых не требуется высокой термостойкости, являются полиэфирные смолы, которые относительно дешевы, обладают хорошей текучестью, хорошо смачивают поверхность волокон и отверждаются при умеренных температурах. В то же время из-за высокой чувствительности к тепловому воздействию отвержденные полиэфирные смолы имеют низкую прочность, плохо сопротивляются удару и проявляют значительную усадку при повышенных температурах. Полиэфирные смолы с успехом применяются для изготовления текстильных композитов самого разного назначения, что позволило накопить значительный опыт в этой области технологии композитов. Таким образом, можно ожидать, что полиэфирные смолы окажутся вне конкуренции для изготовления текстильных конструктивных композитов, работающих в диапазоне умеренных температур.

Для высокотемпературных областей применения основным связующим для текстильных композитов являются эпоксидные смолы. Они обладают высокой прочностью и отверждаются при сравнительно невысоких температурах (до 160 °С). Вследствие меньшей температурной чувствительности эти системы характеризуются меньшей усадкой и меньшей склонностью к ползучести, чем полиэфирные. К отрицательным свойствам эпоксидных смол относятся высокая стоимость и токсичность, чрезмерная твердость, а также пониженная прочность при высоких температурах. В целом, по присущему им комплексу свойств, эпоксидные смолы являются наилучшими из доступных полимерных систем для изготовления композитов, работающих при повышенных температурах, когда их высокой жесткостью можно пренебречь. Сильные ударные воздей-

ствия или высокие удельные напряжения при высоких температурах эксплуатации требуют от композита повышенной ударной вязкости. В этом случае необходимо применять рецептуры эпоксидных смол, обладающих большей эластичностью. Такие рецептуры существуют, однако их применение связано с необходимостью выбора между улучшенной ударной вязкостью и снижениями термостойкости, прочности и жесткости.

В общем объеме производства стеклопластиков в России связующие на основе фенолоальдегидных смол составляют наибольшую долю благодаря давно налаженному промышленному производству, дешевизне, сочетанию таких ценных свойств, как теплостойкость, жесткость и относительно высокая адгезия к стеклянному волокну (14,7–24,5 МПа). Они используются в виде спиртовых растворов, водных дисперсий порошков в производстве пресс-материалов типа ДСВ и АГ-4, стеклотекстолитов, листов, рулонных и рулонированных материалов.

Фенолоальдегидные смолы представляют собой продукты поликонденсации фенола, а также его производных (крезолов, ксиленолов и др.) с альдегидами (формальдегидом, фурфуролом и др.) [16]. Однако вследствие значительной хрупкости эти смолы в чистом виде для изготовления стеклопластиков применяются мало. Чаще всего их модифицируют поливинилбутиралем, анилином или используют в композиции с другими смолами, в частности, с эпоксидными. Для получения высокопрочных и устойчивых к действию кислых и щелочных сред пресс-материалов фенолоформальдегидные смолы (смесь резолы и новолака) применяются в композиции с эпоксидиановой смолой; при получении быстроотверждающихся стекловолоконитов марки СГ фенолоформальдегидную смолу модифицируют эфирами целлюлозы (время отверждения сокращается в 2–3 раза) [17].

В последнее время находят применение твердые или в виде лаков аминокфенольные (гексафенольные) смолы [17], получаемые конденсацией фенола с гексаметилентетрамином [18]. Эти смолы отличаются высокими физико-механическими показателями и пониженной горючестью вследствие наличия в структуре связанного азота. На основе гексафенольных смол разработаны твердые порошкообразные или жидкие антистатированные связующие, позво-

ляющие получать стеклопластики с низким поверхностным электрическим сопротивлением ($1 \cdot 10^7$ – $1 \cdot 10^8$ Ом·см по сравнению с $1 \cdot 10^{14}$ Ом·см для исходной смолы), что имеет первостепенное значение для ряда изделий (вентиляционные воздуховоды для шахтных выработок, обшивочные материалы).

В связи с тем, что фенолоформальдегидные смолы и композиции на их основе используются в производстве стеклопластиков преимущественно в растворах или в порошкообразном виде, получить литые образцы для испытаний неармированных смол весьма сложно.

Кремнийорганические смолы и связующие – полиорганосилоксаны – выгодно отличаются от других смол своей инертностью к различным органическим растворителям, за исключением ароматических и хлорированных, и минеральным маслам, работоспособностью в широком интервале температур (173–623) °К и хорошими диэлектрическими свойствами [19, 20].

Адгезия кремнийорганических связующих к волокнам составляет 14,6–18,6 МПа [21]. Однако их когезионная прочность относительно невелика, в силу чего механическая прочность кремнийорганических стеклопластиков значительно ниже полиэфирных, фенольных и эпоксидных. Требующиеся значительные давления формования, длительный цикл отверждения и высокая стоимость также ограничивают применение кремнийорганических связующих областью электроизоляционных и теплозащитных стеклопластиков.

В производстве стеклопластиков используются смолы марок К-9 и К-31, полиметилсилоксановые лаки КО-554 и КО-812. Смола К-9 имеет температуру размягчения (333–358) °К и продолжительность полимеризации 50–180 мин при 473 °К. Лак КО-812 представляет собой толуольно-ацетоновый раствор продуктов гидролитической поликонденсации метилтрихлорсилана, бесцветный или желтого цвета с содержанием сухого остатка 40 ± 3 %. Продолжительность желатинизации при 473 °К – не менее 1 мин.

Для изготовления деталей конструкционного, радио- и электротехнического назначения методом литья под давлением применяют термопластичные смолы, наполненные стеклянным волокном, а прежде всего – полиамиды, поликарбонаты, полипропилен.

Наибольшее применение в отечественной промышленности нашли полиамиды.

Поликарбонаты [22] – продукты поликонденсации эфиров или хлорангидридов угольной кислоты и диоксисоединений жирного или ароматического ряда. В производстве стеклопластиков типа ДС-25 применяют поликарбонат «дифлон», получаемый методом прямого фосгенирования дифенилолпропана. Дифлон выпускается в виде гранул диаметром 2–4 мм и длиной 8 мм от бесцветного до светло-желтого или светло-коричневого цвета. Процесс отверждения протекает в одном из компонентов композиционного материала, однако другие компоненты активно влияют на него.

Термореактивные смолы, составляющие основу связующих для стеклопластиков, в исходном состоянии являются, как правило, жидким продуктом, вытянутые молекулы которого содержат значительное количество боковых функциональных групп. В присутствии отверждающих добавок и обычно при нагреве эти молекулы последовательно соединяются друг с другом через активные функциональные группы поперечными связями. В процессе реакции когезионные связи между молекулами возрастают настолько, что перемещение молекул относительно друг друга становится почти невозможным, количество активных центров уменьшается и реакция прекращается. Образовавшаяся молекулярная структура пространственно-сшитого твердого полимера сообщает ему принципиально новые свойства. Отвержденный полимер характеризуется стабильностью свойств, которые при длительном хранении могут оставаться без изменения, и только нагрев выше допустимых температур вызывает процессы деструкции.

Отверждение представляет собой необратимый процесс превращения реакционноспособных олигомеров в нерастворимый и неплавкий продукт трехмерной структуры и связано с иницированием и раскрытием двойных связей. Процесс отверждения термореактивных смол может протекать по одной из двух схем:

1) полимеризация, при которой не выделяется никаких побочных продуктов; такой механизм отверждения характерен, например, для эпоксидных смол; 2) поликонденсация, при которой выделяются газообразные и жидкие побочные продукты (пары воды, фенола,

аммиака, хлористого водорода и др.); такое отверждение характерно, например, для фенолоформальдегидных смол.

Во втором случае бурно выделяющиеся низкомолекулярные продукты циклического и линейного строения затрудняют проведение процесса (для поликонденсации требуется давление до нескольких десятков МПа, в то время как для полимеризации достаточно давление 0,1–0,5 МПа), вызывают появление в материале пор, трещин и других дефектов и тем самым приводят к снижению его прочности.

Полипропилен – продукт полимеризации пропилена в присутствии металлоорганических катализаторов [19]. Используется для получения стеклонаполненного материала марки ТСПП. Полипропилен выпускается в виде гранул или порошка в неокрашенном и окрашенном виде. Различные марки полипропилена отличаются друг от друга в основном показателем текучести расплава.

Роль наполнителей в производстве стеклопластиков чрезвычайно разнообразна. Обычно наполнитель вводят в связующее для регулирования его свойств: повышения вязкости, электропроводности, температуры стеклования и начала деструкции и др. Как правило, наполнитель выполняет ряд функций одновременно: не только регулирование определенных технологических свойств (вязкости, текучести), но и снижение внутренних напряжений, возникающих в процессе отверждения, объемной усадки, а также придание некоторых специфических свойств (пониженной горючести, повышенной водостойкости, стойкости к действию агрессивных сред и др.) [21]. Наполнители оказывают ингибирующее действие при отверждении, снижают максимальную температуру саморазогрева (экзотермы) связующего при отверждении. Качество наполнителей определяется величиной частиц или удельной поверхностью, содержанием влаги, химическим составом, а также – в особых случаях – специальными требованиями. Наиболее дешевыми инертными наполнителями, используемыми, в частности, в производстве полиэфирных пресс-материалов, являются песок, гипс, каолин, полевошпат, мел, тальк. Способ придания стеклопластикам декоративного вида – так называемое крашение в массе, т.е. использование при формовании окрашенного связующего. Второй, менее удобный

способ – предварительное нанесение на форму окрашенного декоративного слоя, состоящего из смолы с введенными в нее пигментами, наполнителями и отверждающими агентами. Для окрашивания стеклопластиков могут быть использованы различные классы красителей: пигменты (неорганические и органические); основные красители; красители, растворимые в органических растворителях; нигрозины, индулины [23]. Неорганические пигменты – смеси солей и окислов металлов. Органические пигменты (азопигменты, антрахиноновые и фталоцианиновые) нерастворимы в воде и в большинстве органических растворителей. Основные красители представляют собой производные азокрасителей, красителей группы малахитового зеленого, группы фуксина, акридина, оксазина и содержат в своем составе одну или несколько аминогрупп. Основные красители растворимы в воде и спирте. Красители, растворимые в органических растворителях, являются производными азокрасителей, кислотных антрахиноновых и других красителей. Индулины – продукты нагревания при (150–200)° С азобензола с анилином и солянокислым анилином. Нигрозины аналогичны индулинам, но с добавлением нитробензола.

Основные требования, предъявляемые к пигментам и красителям: равномерное распределение в связующем и отсутствие миграции на поверхность изделия, высокая красящая способность, яркость, свето- и атмосферостойкость, термостойкость (в случае окрашивания пресс-материалов, перерабатываемых при высоких температурах, или термообработки изделий), инертность по отношению к другим компонентам связующего (наполнителям, отверждающим и иницирующим системам) [23].

Все наполнители и пигменты играют важную роль в установлении сил внутреннего трения, которые возникают при трансформации препрегов. В некоторых случаях такое влияние существенно и поэтому требуются дополнительные исследования при введении в связующее наполнителей и пигментов.

1.3. Структурная организация тканых наполнителей для композиционных материалов

В современном производстве для композиционно-волоконного материала (КМ) применяют наполнители, получаемые на основе: 1) прядей или нитей, изготовленных из волокон, а также ровницы (жгутов), 2) тканей и 3) матов (холстов). В первом случае КМ получается путем послойной укладки семейств однонаправленных нитей. В результате образуется слоистая структура взаимно перпендикулярных семейств нитей, у которых отсутствует взаимное переплетение. Во втором случае рассматриваются ортотропные структуры из композиционных материалов, которые представляют собой многослойные среды на основе тканей, имеющих упорядоченное расположение волокон. Все слои сориентированы в одном направлении. Эта система пропитана полимерным связующим. Необходимо отметить, что тканые материалы создаются из нитей и первоначально обладают высокой гибкостью. Существуют две причины этой гибкости: 1) гибкость самой нити, состоящей из тонких параллельных волокон, движение которых ограничивается только трением между ними при деформировании, 2) структура ткани создается путем переплетения нитей без жесткой связи в местах переплетения. Это означает, что перемещение отдельных нитей или волокон в структуре, вызванное усилиями, приложенными к ткани, имеют свойства, аналогичные свойствам тела с подвижной структурой: Колганов [24].

Для построения модели расчета препрегов берется за основу иерархическая структурная организация этих материалов. Композиты в принципе можно охарактеризовать как определенную комбинацию разнородных материалов, обладающую специфическими структурой и геометрической формой. Если пренебречь молекулярными эффектами в волокнах и характерными чертами изделий в целом, то в общем случае можно выделить четыре основных уровня: волокно → нить → ткань → композит. Первый уровень включает моноволокно, образованное вытяжкой через одну фильеру из расплава с последующей обработкой, обеспечивающей фиксацию формы. Волокна собираются в нити, которые составляют второй уровень рассмотрения. Наиболее важный тип нитей, пригодных для

переработки в композиты, – многоволоконные нити, экструдированные из прядильной головки с большим количеством отверстий. Нить, как правило, содержит около 1000 элементарных волокон. Пучки параллельных элементарных волокон обладают когезионной прочностью в поперечном направлении и легко разделяются на отдельные ленты, которые, конечно, не отличаются особыми признаками, так как легко делятся на еще меньшие ленты или объединяются в большие пряди. Поэтому, при производстве волокон имеет смысл воздействовать на группу волокон так, чтобы поддержать целостность, определенную плотность и приблизительно круглое сечение нити. Традиционно этого добиваются незначительной круткой (порядка 1 об/см), однако по новейшей методике нить пропускают через воздушное сопло, что обеспечивает образование своего рода переплетения, геометрически представляемого как нерегулярное «ложное плетение», поскольку траектории волокон остаются раздельными и невзаимосвязанными. Небольшая непрямолинейность волокон, появляющаяся в результате этих процессов, не оказывает существенного влияния на свойства при растяжении, если волокна однородны. Реакция пучка параллельных волокон на растягивающую нагрузку равна сумме реакций отдельных волокон, а вклад системы волокон в целом входит через статистические эффекты изменчивости свойств от волокна к волокну и вдоль волокна: Воробьев и др. [25–32].

Непрерывное стеклянное волокно получается путем утонения струйки расплавленной стекломассы механическим вытягиванием. Известны двухстадийный и одностадийный способы выработки непрерывного стеклянного волокна. При двухстадийном (менее производительном) процессе стеклянное волокно вырабатывают из фильерированных стеклоплавильных сосудов, питаемых предварительно изготовленными стеклянными шариками или специальными стеклянными стержнями – штабиками. В процессе вытягивания элементарные нити покрываются замазливателем и собираются в комплексную нить. При одностадийном процессе расплавленная масса прямо из стекловаренной печи поступает в фильерный питатель (специальная пластина из тугоплавкого сплава) с множеством отверстий определенного диаметра. Стеклянные нити вытягиваются из фильерного питателя, собираются в нитесборнике и либо нама-

тываются на текстолитовую бобину, либо в виде восьмерок укладываются на движущийся конвейер, образуя стеклянный мат.

Поверхность непрерывных стеклянных волокон в процессе вытягивания покрывается замасливателем для защиты волокон от разрушения при трении друг о друга и о детали перерабатывающего оборудования, а также для склеивания их в нить. Такие замасливатели называются текстильными. В отечественной промышленности наибольшее распространение получил парафиновый водно-эмульсионный замасливатель (парафиновая эмульсия). За рубежом используют текстильные замасливатели на основе крахмала. Текстильные замасливатели препятствуют адгезионному взаимодействию между волокном и связующим, в результате чего в условиях повышенной влажности существенно ухудшаются механические и диэлектрические показатели стеклопластиков.

Причина высокой прочности стеклянного волокна кроется в технологии его получения и связана с высокой скоростью механической вытяжки расплава стеклянной массы, увеличением скорости охлаждения волокна и уменьшением диаметра получаемых нитей. В современном производстве используются волокна диаметром 3–11 мкм.

Следующий уровень представляют тканые, трикотажные, плетеные материалы, полученные с помощью специальных способов переплетения нитей. Строение ткани определяется совокупностью различных факторов, в том числе геометрическими характеристиками взаимного расположения нитей основы и утка с перегибами друг на друга при переходе с одной стороны ткани на другую. При перегибах друг на друга согласно закономерности переплетения между натянутыми нитями основы и утка возникают силы взаимного давления. В результате этого возникают силы трения и сцепления между нитями, которые удерживают отдельные нити в ткани как в едином целом изделии.

Строение ткани зависит от следующих основных факторов: Догматовский [33]:

- сырьевого состава нитей;
- вида нитей и способа их получения;
- линейной плотности нитей, текст;
- формы и размеров поперечного сечения нитей;

- физико-механических свойств нитей;
- переплетения нитей в ткани;
- плотности нитей в ткани по основе и по утку;
- технологических параметров выработки ткани на ткацком станке (натяжение нитей, форма зева, частота вращения главного вала станка и т.д.).

Формирование стеклянной ткани, как и всякой другой ткани, происходит в результате взаимного переплетения двух семейств нитей (основы и утка). Основные нити располагаются вдоль ткани, уточные нити – в поперечном направлении ткани. Переплетением называется определенный порядок чередования перекрытий одной системы нитей с нитями другой системы. Переплетение нитей в ткани определяет ее строение. При выработке тканей используют разнообразные переплетения. Их делят обычно на четыре класса: простые (главные), мелкоузорчатые, сложные и крупноузорчатые.

К простому (главному) переплетению относятся: полотняное, саржевое и атласное (сатиновое). Полотняное переплетение является одним из наиболее простых и распространенных. Основные и уточные нити в нем чередуются через одну, что обеспечивает достаточную прочность ткани.

Предсказание физико-механических свойств тканых композитных материалов и проектирование тканей под заданные свойства весьма важно для их применения в технике. Сложность объемной структуры плетений и наличие различных иерархических уровней (10^{-5} м – волокна, 10^{-3} м – нити/жгуты, 10^{-1} м – ткань, 10^0 м – конструкция) определяет высокую сложность математических моделей и существенную неопределенность, приводящих к накоплению ошибок при переходе с одного уровня на другой.

С другой стороны такая иерархия обеспечивает универсальность процедуры моделирования для всего многообразия тканых структур. Ключ к успеху интегрированного моделирования лежит в объединении механики композитов и текстильного материаловедения.

Варьирование структуры (топологии переплетения) ткани – эффективный путь оптимизации текстильного армирования. Исходными данными для моделирования являются: линейная плотность нитей, их поперечное сечение в свободном состоянии, диаграммы сжатия и изгиба, топология переплетения, плотность ткани. Резуль-

татом расчета геометрии нитей, основанном на принципе минимума энергии нитей, является форма нитей и изменение размеров сечения вдоль нитей [34].

Если ткань деформирована, то модель расчета может быть реализована в новой, системе координат. Сравнивая натяжение, изгиб и сжатие нитей в исходной и деформированной конфигурации, можно рассчитать усилия, вызвавшие деформации. Такой подход через известные деформации наиболее соответствует технологиям трансформации, когда известны начальная и конечная конфигурации.

В настоящей работе не ставится цель конструирования ткани, структура которой предполагается известной. Задача стоит в предсказании предельных деформационных характеристик ткани (препрега) при трансформации с учетом ее реальной начальной структуры. Нас будут интересовать, в первую очередь, предельные возможности сдвиговой деформации и способы ее прогнозирования и экспериментального определения.

1.4. Ткани гладкого переплетения и их характеристики

Анализ начнем со структуры конструкционных тканей.

Структурные характеристики ортогональных тканей отечественного изготовления определяются в соответствии с нормативными документами – стандартами и техническими условиями. Из значительной номенклатуры производимых на сегодняшний день тканей необходимо выбрать те, которые наилучшим образом отвечают поставленной задаче – обеспечения условий трансформации. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются стеклянные конструкционные ткани из крученых нитей. Характеристики некоторых видов тканей представлены в таблице 1.1 [35].

Ткани изготавливают шириной $H = 70, 80, 92, 100, 110, 115$ см. Стандартная ширина обычно равна 92 см. Для изготовления тканей также применяются ровинги. Ровинговые ткани вырабатываются полотняным плетением из ровингов, состоящих из комплексных нитей (сложенный ровинг) или прямых ровингов, образованных элементарными нитями.

Таблица 1.1

Характеристика тканей

Марка ткани	Структура нити		Количество нитей на 1 см		Вид переплетения ткани
	Основа	Уток	Основа	Уток	
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
T-10	ЕС 6 26x2	ЕС 6 26x2	36+1	20±1	Сатин 8/3
T-13	ЕС 7 54x2	ЕС 7 54x2	16+1	10±1	Полотняное
T-41	ЕС 9 34x3	ЕС 9 34x3	16+1	16±1	Сатин 5/3
T-33	ЕС 6 17x2	ЕС 6 17x2	16+1	16±1	Полотняное
T-СУ (ВМ)	ВМС8 28x2	ВМС8 28x2	24+1	32±1	Сатин 8/3

Физико-механические показатели указанных тканей приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Физико-механические показатели тканей

Марка ткани	Поверхностная плотность, г/м ²	Номинальная толщина ткани, мм	Разрывная нагрузка не менее, Н	
			Основа	Уток
T-10	290	0,23	2450	1323
T-13	285	0,27	1764	1176
T-41	330	0,26	1764	1764
T-33	110	0,11	588	588
T-СУ (ВМ)	320	0,27	2156	2842

В таблице 1.3 приведены параметры углеродной ткани УТ-900 [104]. Углеродную ткань вырабатывают по основе и по утку из углеродной нити УКН-П (ТУ 1916-169-05763346-96) с количеством филаментов 2500 применяемой для углерод-углеродных материалов (УУКМ) или из углеродной нити УКН-М (ТУ 1916-146-05763346-96) с количеством филаментов 3000, применяемой для полимерных композиционных материалов. Ткань УТ-900 имеет саржевое переплетение с равным количеством углеродных нитей в основе и утке ткани.

Таблица 1.3

Параметры углеродной ткани УТ-900

Марка ткани	Поверхностная плотность	Количество нитей на 10 см		Ширина ткани, мм	Толщина ткани в пластине со связующим марки ЭНФБ
		Основа	Уток		
УТ-900-240	240±20	60±20	60±20	900±7	0,2±0,02
УТ-900-260	260±20	65±20	65±20	900±7	0,22±0,02
УТ-900-280	280±20	70±20	70±20	90±7	0,25±0,02

В таблице 1.4 приведены структурные параметры конструкционных стеклосинтетических тканей, предназначенных для изготовления высокопрочных органопластиков на основе эпоксидных и фенольных смол. Данные ткани относятся к классу гибридных тканей, в которых по основе уложены арамидные нити НСВМ, Армос, Русар с линейной плотностью 58,8 текс, а по утку высокомодульные стеклянные нити со структурой ВМПС 10-40х1х2(70) (ткани Т-42 (НСВМ), Т-42 (Армос), Т-42 (Русар)).

Для тканей марок ТСА-3, ТСП-3 применяются арамидные нити Армос и Русар с линейной плотностью 29,4 текс и стеклянные нити ВМПС 8-28х1х2(100). Ткани вырабатываются переплетением сатин 5/3. Ширина тканей составляет 92±2 см.

Таблица 1.4

Структурные параметры стеклосинтетических тканей

Марка ткани	Количество нитей на 1 см		Поверхностная плотность, г/см ²	Толщина, мм	Разрывная нагрузка полоски шириной 25 мм, Н	
	Основа	Уток			Основа	Уток
Т-42	18 ⁺¹ _{-0,5}	20±1	280±20	0,32±0,03	3240÷3630	1960÷2160
ТСА-3	20+1	21±1	190±20	0,23±0,03	2060	1470
ТСП-3	То же	То же	То же	То же	2450	1470

В таблице 1.5 приведены характеристики арамидной ткани артикул 5363/15 [36], применяемой для изготовления бронезилетов и защитных шлемов. Ткани вырабатываются из нитей СВМ, Армос, Русар плотностью 58,8 текс полотняным переплетением. По согласованию с заказчиком тип переплетения можно изменить. Стандартная ширина ткани – 105±2 см.

Таблица 1.5

Характеристики арамидной ткани 5363/15

Поверхностная плотность, г/м ²	Количество нитей на 10 см		Толщина, мм	Разрывная нагрузка полоски 25 мм, Н	
	Основа	Уток		Основа	Уток
170	150 ⁺⁵ ₋₁₀	135±5	0,27±0,2	2940	3040

Также для средств бронезащиты отечественной промышленностью выпускаются ткани полотняного переплетения на основе комплексной арамидной нити Тварон производства фирмы Акзо Нобель Арамид Продактс (Голландия) с линейной плотностью 110 текс. Характеристики тканей представлены в таблице 1.6 [35].

Таблица 1.6

Характеристики тканей на основе арамидной нити

Марка ткани	Марка нити, линейная плотность	Поверхностная плотность, г/м ²	Количество нитей на 10 см		Толщина ткани	Разрывная нагрузка полоски шириной 25 мм, Н		Удлинение при разрыве, %	
			Основа	Уток		Основа	Уток	Основа	Уток
Артикул 8378	Тварон обр. 8448-96, 110 текс	200±10	82±2	95±2	0,2±0,22	3500	3350	3,0	3,5
Тексар-ТТ	Тварон типа 2040, 110 текс	255±8	110±5	110±5	0,28±0,3	3720	3920	6,5	6,5
Тексар-ТА	Армос, 110 текс	240±10	110±5	110±5	0,28±0,3	3720	4410	8,0	6,0

Рассмотрим структуру плетения тканей.

Для конструкционных тканей используются, в основном, полотняное, сатиновое и саржевое переплетения (рис.1.1). Данные

переплетения относятся к классу главных и имеют следующие свойства [37]:

- наличие только одного основного или уточного перекрытия на каждой нити;
- одиночные перекрытия располагаются с постоянным сдвигом;
- равное число основных и уточных нитей в раппорте (количество нитей в повторяющемся рисунке).

Полотняное переплетение является самым простым. Нити основы и утка переплетаются между собой через нить, что придает ткани повышенную жесткость и прочность. Раппорт полотняного переплетения $R = 2$.

В сатиновом (атласном) переплетении перевязка основы с утком осуществляется посредством одиночных основных или уточных перекрытий, которые равномерно располагаются в пределах раппорта переплетения, не соприкасаясь друг с другом. Раппорт сатинового переплетения обозначается простой дробью, в которой числитель показывает число нитей в раппорте, а знаменатель – величину сдвига одиночных перекрытий вдоль утка. В сатиновом переплетении преобладают уточные настилы, в атласном – основные. Минимальное количество нитей в раппорте $R = 5$.

Характерной особенностью саржевого переплетения являются наклонные линии – диагонали, которые образуются в результате расположения основных перекрытий на лицевой стороне ткани со сдвигом, равным единице. при одинаковой плотности и толщине основы и утка диагонали располагаются под углом 45° к длине ткани. Раппорт саржи обозначается простой дробью, у которой числитель обозначает число основных перекрытий на одной уточнице, а знаменатель – число точных перекрытий на той же уточнице. Сумма числителя и знаменателя показывает число нитей в раппорте переплетения. Наименьший раппорт саржевого переплетения $R = 3$. Различают уточную и основную саржу. В уточной сарже на лицевой стороне преобладают уточные перекрытия, в основной сарже – основные.

Поперечные деформации нитям являются сжимающими. Для реализации этих деформаций нити основы должны смещаться, а ткань уплотняться. Поэтому наибольшую деформируемость из рассмотренных тканей следует ожидать у сатинов с максимальным

числом нитей в раппорте. Ниже по этому показателю идут ткани саржевого плетения и наименьшая деформативность будет у тканей полотняного плетения.

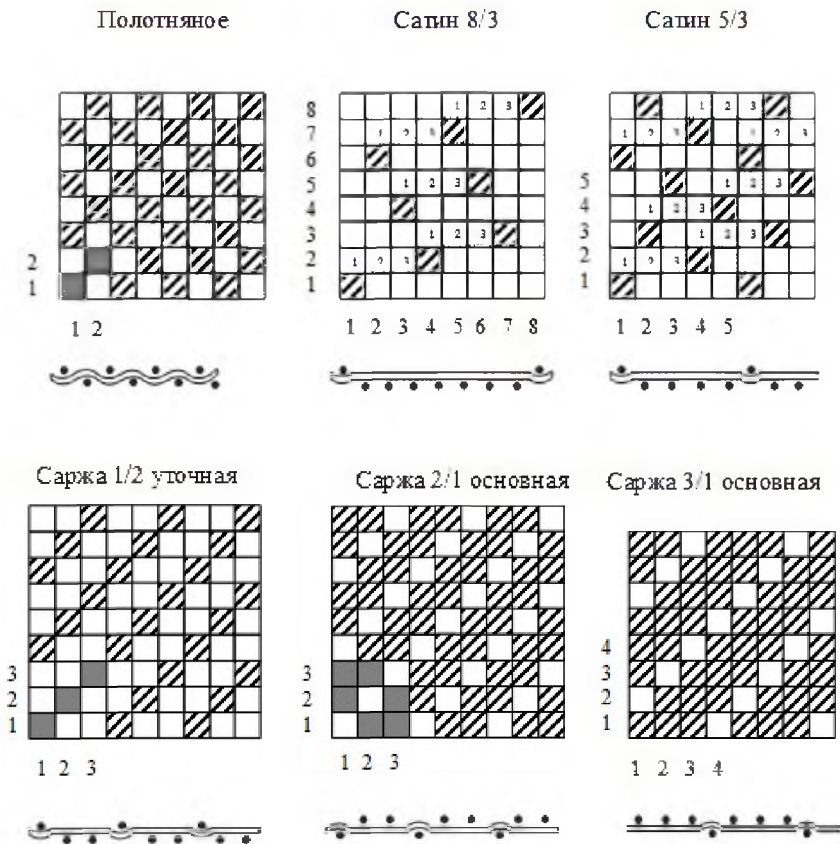


Рис. 1.1. Типы переплетений

1.5. Мультиаксиальные ткани

Рассмотренные выше ткани относятся к классу тканей, получаемых путем переплетения семейств нитей между собой в процессе их изготовления. Нити в узлах переплетения не имеют жёстких связей. Другая группа тканей выделяется в отдельный класс ввиду существенного различия в методах их изготовления - мультиаксиальные ткани: Хиладжинов [38, 39].

Мультиаксиальные ткани – это нетканые материалы, в которых нити из Е-стекла выложены в слои параллельно друг другу. Каждый слой укладывается под определенным углом, в зависимости от необходимого направления армирования. Эти слои удерживаются вместе неструктурной прошивной нитью, обычно полиэфирной. В дополнение к нескольким слоям волокна в структуру мультиаксиальной ткани может быть добавлена поверхностная вуаль и/или слой рубленого стекломата (см. рис. 1.2).

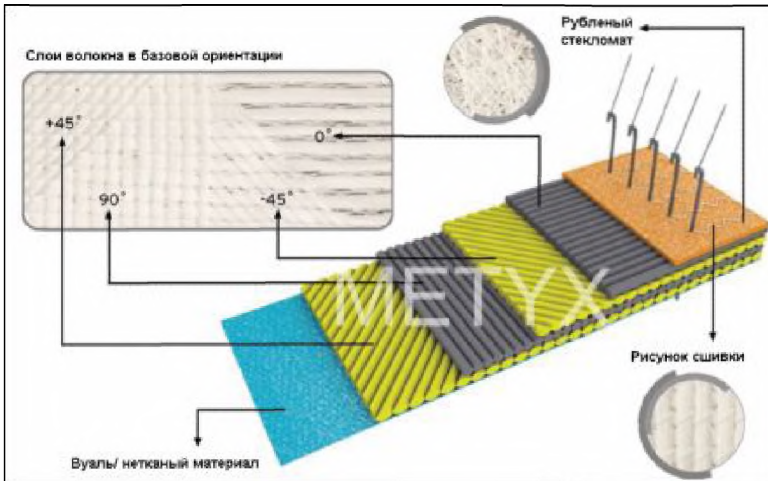
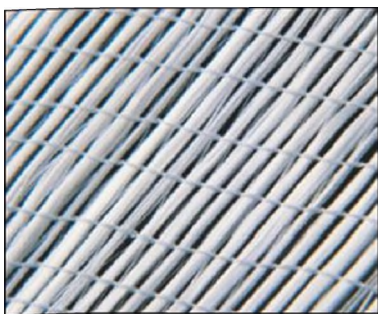


Рис. 1.2. Структура мультиаксиального армирующего материала

Стандартной является ориентация нитей в направлениях 0° , 90° , $+45^\circ$, -45° . Но стоит отметить возможность изменения угла от $\pm 20^\circ$ до $\pm 90^\circ$, что позволяет использовать прочность стеклянных волокон в композиционном материале в нескольких направлениях.

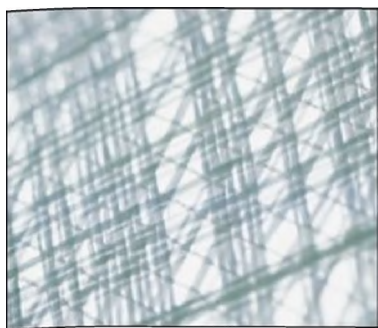
В зависимости от количества слоев различают четыре вида мультиаксиальных тканей: а) моноаксиальные (однонаправленные), б) биаксиальные (двунаправленные), в) триаксиальные (ориентация в трех направлениях) и г) квадроаксиальные (четыре угла ориентации волокон) (см. рис. 1.3).



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.3. Виды мультиаксиальных тканей

Как было отмечено, слои ткани прошиваются полиэфирной нитью или другой нитью, или скрепляются полимерными клеями. Следует несколько подробнее остановиться на способе оформления прошивной нити. Дело в том, что прошивная нить сильно влияет на величину относительных неупругих деформаций ткани, поэтому от этого зависит ее подвижность в процессе деформирования изделия. В отдельных случаях подвижность ткани обеспечивает возможность изготовления криволинейных поверхностей.

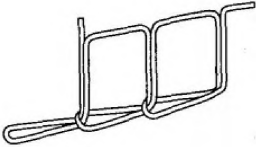
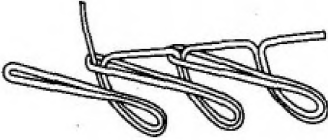
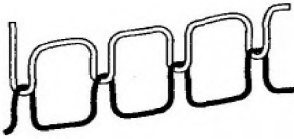
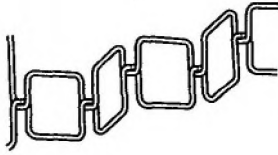
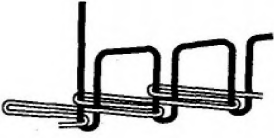
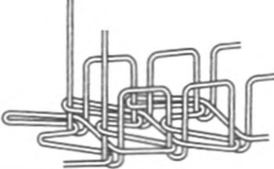
Какого бы назначения и какой бы конструкции ни была швейная машина, она выполняет один из типов машинных стежков, который принято обозначать трехзначным числом. Стежок – это повторяющийся элемент ниточной строки, расположенный между двумя соседними проколами иглы и представляющий собой законченное переплетение ниток в материале. Ряд последовательных стежков представляет собой строчку, а соединение нескольких слоёв материала определенным образом является швом. Все существующие типы стежков, как машинные, так и ручные, разделены (ГОСТ 12078–8) на семь классов [40–42]. В таблице 1.7 приведены типы машинных швов.

В таблице не приведены швы ручных групп 200 и 600, обметочные (группа 500) и сварные группы 700, так как они не применяются при формировании мультиаксиальных тканей.

Машинные стежки, выполняемые на швейных машинах, разных по конструкциям и назначению, разделяются на челночные и цепные. Челночные стежки состоят из двух ниток: верхней нитки или нитки иглы, и нижней нитки, или нитки челнока. Верхняя и нижняя нитки переплетаются обычно внутри сшиваемых материалов и образуют на их поверхности непрерывный ряд лицевых ниток, которые имеют прямолинейное, зигзагообразное или другое расположение. Челночные стежки образуются по принципу проведения в петлю первой нитки конца второй нитки. На швейных машинах челночного стежка можно выполнять строчки трех основных видов: стягивающую (кл. 301), зигзагообразную (кл. 304) и потайную.

Таблица 1.7

Типы стежков

Наименование стежка	Графическое изображение	Кодовое обозначение стежка
Однониточный однолинейный прямой цепной		101
Однониточный цепной потайной		103
Двухниточный однолинейный прямой челночный		301
Двухниточный однолинейный зигзагообразный челночный		304
Двухниточный однолинейный прямой цепной		401
Трехниточный двухлинейный цепной		406

Цепные стежки образуются путем введения петли последующей нитки в петлю предыдущей. Цепные стежки бывают однопетельные (кл. 101, кл. 103), двухпетельные (кл. 401) и трехпетельные (кл. 406). Сверху стягивающая цепная строчка ничем не отличается от челночной, снизу она состоит из ряда петель, образующих цепочку.

Анализ всех приведенных швов показывает, что прошивные нити, приведенные в таблице 1.7, имеют неупругую составляющую при ее растяжении вдоль шва. Эта неупругая составляющая имеет наименьшую величину у стягивающей строчки. Остальные швы имеют эту неупругую составляющую в разы больше. Тем не менее, все швы требуют экспериментальной проверки, так как опыт показывает, что если на стадии формования изделия неупругая составляющая деформации будет реализована, то прочностные свойства композиционного материала после полимеризации связующего будут заметно выше. Поэтому такие работы по определению величины неупругой составляющей шва позволят заранее планировать их выполнение на мультиаксиальных тканях, которые запрограммированы для формования оболочек разрабатываемых изделий.

Ряд технологических проблем, возникающих при проектировании и изготовлении изделий из композиционных материалов можно решить применением мультиаксиальных тканей. Производство мультиаксиальных тканей «Арматон» освоено компанией «Стеклонить» в 2007 году. Сегодня с уверенностью можно говорить о необходимости таких армирующих наполнителей в российской отрасли композиционных материалов, что подтверждается интересом и спросом со стороны производителей изделий из стеклопластика. Эксперименты, проводимые совместно с компаниями «Автодизайн», «Кора», «КМТ», ООО «Авангард», показали хорошую пропитываемость материала и высокие физико-механические характеристики.

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

1.6. Препреги

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. Такое обстоятельство открывает перед технологами большие возможности, позволяющие в некоторых случаях упростить оснастку, уменьшить период изготовления изделия, повысить качество изделия и его прочностные свойства. 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, и можно даже снизить величину так называемых остаточных напряжений: Болотин и др. [43–58] в готовом изделии.

В дальнейшем будем иметь дело с многослойными препрегами, состоящими из нескольких слоев однонаправленных нитей или из слоев тканых материалов. Тканые материалы можно рассматривать как совокупность нескольких слоев однонаправленных семейств нитей. При этом такие ткани могут формироваться либо взаимным переплетением нитей (гладкие ткани), либо прошиваться полиэфирной нитью (мультиаксиальные ткани). Во всяком случае, все эти препреги характеризуются возможностью осуществлять большие перемещения нитей со скольжением.

Когда происходит изменение формы тела и взаимное расположение его частиц, то становится очевидным, что данное тело деформируется. Таким образом, деформация характеризуется изменением взаимного расположения частиц тела. В классической теории упругости перемещения считаются относительно малыми, однако при рассмотрении деформации препрегов, перемещения могут достигать большой величины за счет неупругой составляющей.

Будем предполагать, что препреги представляют собой плоские многослойные структуры; каждый слой состоит из двух взаимно-

перпендикулярных и связанных между собой семейств нитей тканого материала. Пусть в начальном или недеформированном состоянии семейства нитей препрега параллельны осям координат, причем первое семейство нитей параллельно оси Ox , а второе – оси Oy (рис. 1.3). Для препрегов необходимо знать перемещения точек каждого семейства нитей. Возьмем точку (x, y) препрега в исходном состоянии, которая характеризует пересечение нити первого семейства с координатой y и нити второго семейства с координатой x . После деформации точки соприкосновения нитей разойдутся и будут находиться в одной плоскости, однако в разных местах. Вычисления перемещений по заданным нагрузкам необходимо проводить для нитей каждого семейства. При этом предполагается, что каждая нить семейства перемещается так, что не имеет разрывов между точками, принадлежащими этой нити [59].

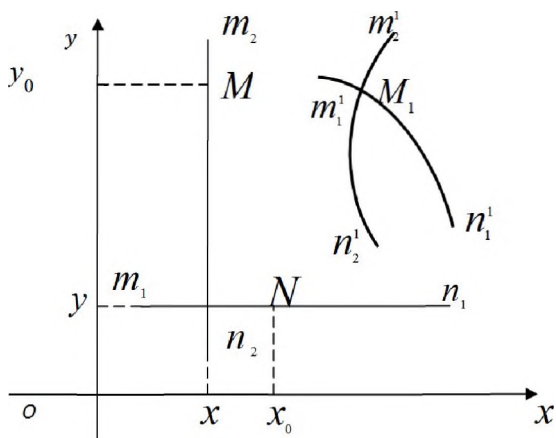


Рис. 1.4. Перемещение точек нитей препрега в условиях деформации

На рис. 1.4 показано, как перемещаются точки нитей препрега в результате деформации. До деформации нить первого семейства занимает положение $m_1 n_1$, а после деформации – положение $m_1' n_1'$.

Нить второго семейства m_2n_2 , после деформации занимает положение $m_2^1n_2^1$. Точки M и N , лежащие на нитях разных семейств до деформации, после деформации совпадают в точке M_1 . Аналогичные рассуждения можно провести и для семейств нитей расположенных под углом α в исходном положении, например, для биаксиальных тканей.

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 плоскости их соприкосновения возникает сила сопротивления их относительно скольжению, т.е. сила трения скольжения. Величина этой силы, конечно, зависит от многих факторов, основными из которых являются: способ переплетения семейств нитей, вязкость связующего, а, следовательно, температура КМ, давление внутри слоев пакета. Сила трения скольжения τ между семействами нитей может принимать значения от нуля до значения τ_{np} , называемого предельной силой трения скольжения. Величина силы трения будет равна предельному значению τ_{np} лишь тогда, когда действующая на нить сдвигающая сила достигает такого значения, что при малейшем ее увеличении нити начинают двигаться (скользить). Такой способ рассмотрения напряженно-деформированного состояния препрегов предложен в работе [60].

1.7. Основные свойства препрегов и их использование в технологических процессах изготовления изделий из композиционных материалов

Технологический процесс изготовления изделий из композиционно-волокнистых материалов состоит из следующих стадий: формирование основных и свободных поверхностей заданной геометрии, т.е. получение полуфабрикатов в виде слоистой структуры семейств волокон (нитей) пропитанных связующим, отверждение связующего, механическая обработка поверхностей изделия до требуемых размеров. Особый интерес представляет стадия получения

полуфабриката. На этой стадии можно производить некоторые дополнительные операции, позволяющие заменить механическую обработку после отверждения связующего.

В этой связи альтернативой просверленным отверстиям является формирование их методом прокалывания: Эйдельман и др. [60–67] в еще неотвержденном полимерно-волокнистом материале конструкции. В процессе формирования отверстия с помощью заостренного стержня-индентора происходит раздвигание нитей и нарушение регулярной структуры материала изделия. Силовое поле армирующих волокон не прерывается. Стенка отверстия из-за повышенного содержания волокон уплотняется.

Впервые идея прокалывания отверстий в армированных пластиках предложена в работе Эйдельмана [61]. Дальнейшее развитие этой идеи получило в работах [68–73]. Несмотря на то, что при получении таких отверстий армирующие волокна остаются целыми, в них создаются растягивающие напряжения, которые могут, при определенных условиях, сохраниться в отвержденном материале в виде остаточных напряжений. В предельном состоянии крайние нити, соприкасающиеся со стержнем, могут даже разрушаться. Существуют технологические приемы снижения этих напряжений: Колганов и др. [64, 65, 74–79]. Например, прокалывающий стержень должен иметь переменное сечение, нижняя часть которого имеет диаметр больше заданного. Таким образом, вначале прокалывающий стержень под действием силы оформляет отверстие диаметром больше заданного. Под действием этой же силы стержень продолжает движение и фиксируется в положении, когда верхняя часть стержня будет располагаться в отверстии. Образовавшийся зазор вследствие упругих деформаций заполняется полуотвержденным материалом. В результате напряжения в нитях композиционно-волокнистого материала резко уменьшаются. В районе отверстия их уровень можно снизить таким способом практически до нуля [60].

Важной областью использования препрегов является формирование изделий на гибких оправках, например, путем изгиба из цилиндрической оболочки можно получить торовую. 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 тка-

ни 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 исследований и выработки практических рекомендаций по изготовлению торовых и других подобных оболочек. Решению этой задачи посвящена работа Горелого К.А. [80].

Тканые материалы создаются из нитей и первоначально обладают высокой гибкостью. Существуют две причины этой гибкости: 1) гибкость нитей, состоящих из тонких параллельных волокон, движению которых препятствует только трение между ними при деформировании, 2) структура ткани создается путем переплетения нитей или методом прошивки без жесткой связи в местах переплетения. Это означает, что перемещения отдельных нитей или волокон, вызванные усилиями, приложенными к ткани, имеют свойства, аналогичные свойствам тела с подвижной структурой [81].

При описании геометрической модели препрегов рассматриваются деформации, не выходящие за рамки слоев в поперечном направлении. На этом основании деформационные свойства одного слоя ткани можно отождествлять с аналогичными свойствами многослойного препрега. Для рассматриваемых тканей справедливы следующие свойства.

1. Существует предельное значение длины нити, которую можно вытащить из ткани не подвергая ее разрыву. Для тканей гладкого переплетения, например, у стеклоткани Т-13, эта величина составляет более одного метра [82].

2. Конструкция тканей гладкого переплетения предусматривает изгиб нитей в узлах их переплетения. Такое обстоятельство влияет на деформационные свойства нитей в составе ткани при растяжении. Первоначально они распрямляются. В дальнейшем нити ведут себя как обычно: они упруго растягиваются. Первая стадия закан-

чивается быстро при небольшой по величине нагрузке. Однако эта составляющая деформации по величине может превзойти даже упругую составляющую [83], поэтому пренебрегать этим нельзя. Назовем эту деформацию неупругой составляющей деформации ткани при растяжении и обозначим через γ_{11} и γ_{22} относительные неупругие составляющие деформации ткани в направлении первого и второго семейств нитей соответственно. Для мультиаксиальных тканей такая составляющая деформации равна нулю.

3. Если под действием внешних сил происходит сдвиг нитей одного семейства относительно другого, то такая деформация сопровождается сжатием нитей в поперечном к ним направлении. Само сжатие осуществляется следующим образом. Вначале деформация сжатия происходит за счет более плотного расположения элементарных нитей в рассматриваемом сечении нити. Уменьшаются параметры сечения. Одновременно нити параллельно сдвигаются. Препятствием к таким изменениям являются только силы трения. Дальнейшее перемещение нитей осуществляется только за счет упругой деформации. Таким образом, на первом этапе сжатия имеем неупругие деформации сжатия в плоскости ткани. При этом относительные неупругие составляющие деформации сжатия γ_{12} и γ_{21} первого и второго семейств нитей – это чисто геометрические величины, характеризующие степень уплотнения нитей при их сжатии в поперечных к ним направлениях в плоскости ткани [82].

Рассмотренное сжатие нитей может образовываться и другим путем – в результате поворота одного семейства нитей относительно второго. Такое сжатие тоже имеет неупругую составляющую и упругую часть. При деформации ткани оба эти вида сжатия могут присутствовать одновременно, причем они не заменяют друг друга [83].

Пусть имеем заготовку ткани, которую необходимо уложить на некоторую выпуклую поверхность без складок так, чтобы она соприкасалась с поверхностью. Принципиально это можно сделать следующим образом. Если ткань обладает свойствами 1–3, то, прикадывая к концам нитей растягивающие усилия, мы заставим их лежать на заданной поверхности. В результате заготовка полностью ляжет на поверхность, не образуя складок. Такое положение нитей

на поверхности неоднозначно, так как они могут быть передвинуты на другое место. Варьируя нагрузку, при определенных условиях можно изменять форму заготовки. Такой способ укладки заготовки имеет множество вариантов. Для выбора нужного необходимо установить дополнительные ограничения. Например, можно определить форму заготовки, которую она должна иметь после укладки ее на поверхности, что эквивалентно заданию перемещения концов нитей, или граничных условий в перемещениях. Натяжение нитей должно осуществляться в соответствии с выбранным направлением и быть таким, чтобы обеспечить заданное перемещение концов нитей. Однако, следует заметить, что не для всяких граничных условий это возможно. Такие деформации заготовки сопровождаются возникновением растягивающих усилий во всех точках нитей, сжимающих усилий в нитях в поперечном направлении к ним или отсутствием сжимающих усилий, если поперечные деформации имеют противоположные направления, приводящие к разреживанию ткани. В последнем случае нити на поверхности удерживаются в равновесии силами трения. Решение задачи по укладке квадратного образца ткани на сферическую поверхность представлено в работе [84].

Деформируемость тканей в направлениях, отличных от направлений армирования, может быть существенно больше. На этом свойстве основаны технологические процессы намотки и выкладки с использованием косоугольного армирования тканей, полученных раскроем из ортогональных тканей под углом ϕ . Примером использования таких тканей является изготовление шпангоутов сложного сечения. Суть способа изготовления шпангоута заключается в следующем. Нетканая лента, либо плоская лента диагонального плетения или лента типа «сплюснутый оплеточный рукав» наматываются на оправку с кольцевой канавкой или кольцевым выступом по форме наружного профиля меридионального сечения шпангоута. Форма шпангоута может быть разнообразной. Самая простая конфигурация сечения шпангоута, получаемого рассматриваемым способом, представляет собой ∇ -образный профиль. Сечение шпангоута при получении такого профиля представлено на рис. 1.5.

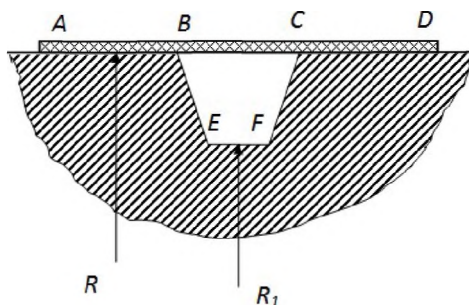


Рис. 1.5. Сечение шангоута

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

Параллельно с намоткой ткани осуществляется намотка кольцевых нитей, утягивающих ткань. В результате она занимает положение ∇ -образной заготовки. Такая трансформация ткани должна сопровождаться ее деформацией. Чтобы ткань в результате деформации не образовывала складок, необходимо, чтобы типичная ячейка ткани деформировалась следующим образом (см.рис. 1.6). Если диагональ AC на оправке расположена вдоль окружности, то при деформации она уменьшается, а диагональ DB – увеличивается. В результате происходит поворот одного семейства нитей относительно второго.

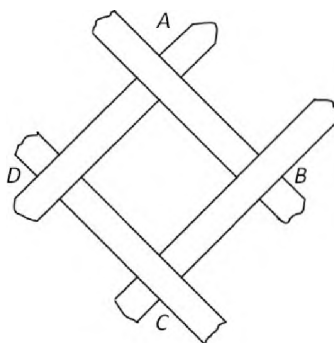


Рис. 1.6. Типичная ячейка ткани

На рис.1.6 нити DA и CB – нити основы, а AB и DC – нити утка.

В процессе трансформации заготовки происходят изменения ее линейных размеров и углов армирования. Так как размеры конечного изделия известны, то требуется решить задачу по определению исходных размеров тканой заготовки. Особенностью постановки задачи является то, что искомые неизвестные параметры могут относиться как к заготовке, так и к изделию. В частности, закон намотки, как правило, выбирается на заготовке.

Кроме деформаций при трансформации необходимо решать задачу о связи координат исходной оболочки и конечной. С технологической точки зрения это позволит правильно выбрать размеры исходной заготовки и сформулировать ограничения на параметры заготовки и конечного изделия. В литературе обнаружено лишь 2 работы, посвященные этой задаче [85, 86]. В работе [86] решалась задача определения формы оболочки-заготовки для изготовления плоского маховика с оптимальным армированием (диск Кайзера). В работе [86] также представлен алгоритм численного расчета параметров заготовки для изготовления торообразной мембраны, форма которой соответствует комбинации поверхностей тора, конуса и диска.

В рассмотренных примерах деформирования препрегов необходимо руководствоваться принципом: «не навреди». На этом основании необходимо исследовать препрег, оценить напряженно-деформированное состояние армирующего материала и его влияние на материал стеклопластика, который будет получен после отверждения связующего. В большинстве случаев встает вопрос об оценке остаточных напряжений. Другой, не менее важный фактор, – это монолитность стеклопластика. Если при трансформации препрега не нарушились условия монолитности, то механические характеристики стеклопластика могут достигнуть своих максимальных значений.

1.8. Основные принципы создания высокопрочных ориентированных стеклопластиков

Пути создания высокопрочных стеклопластиков мало изучены и в попытках изучения таких материалов преобладают эмпирические методы, которые не могут быстро дать необходимый результат, связаны с большими материальными затратами, а также не позволяют оценить, достигнут ли максимальный теоретически возможный уровень показателей. Это приводит к тому, что высокая прочность современных армирующих волокон реализуется в композите далеко не полностью.

В последние годы работами многих ученых было показано [87–92], что решение этой проблемы возможно лишь на основе исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости армированной системы с учетом особенностей стеклопластиков, обусловленных податливой матрицей и существенной неоднородностью материала, прочностные и деформативные свойства которого не являются детерминированными. Развитием такого подхода явилось предложение о введении понятия сплошности композита [93, 94], которое предполагает сплошность всех компонентов, отсутствие нарушений связи по границам их соприкосновения и однородность всей системы в целом. Стеклопластик рассматривается как сплошное тело, если потеря его прочности происходит вследствие нарушения сплошности армирующих элементов при достижении в них предельных напряжений. Необходимость введения понятия сплошности композита связана с тем, что для расчета конструкций из стеклопластика применяется классический аппарат теории упругости анизотропного тела, который может быть лишь для сплошных монолитных материалов.

Монолитность армированного пластика предполагает сплошность его компонентов, отсутствие нарушения связей по границам их соприкосновения и однородность всей системы в целом. Стеклопластиковый композит монолитен до разрушения в том случае, если оно происходит вследствие нарушения сплошности армирующих элементов при достижении в них предельных напряжений. Если же начало разрушения армированного материала связано с нарушением сплошности связующего или связей на границе раздела

фаз или же с потерей устойчивости волокон или слоев, то такой материал не является монолитными, и прочность армирующих элементов используется не полностью.

Прочность и монолитность стеклопластика неразрывно связаны между собой. Нарушение монолитности при нагружении вызывает преждевременное разрушение материала. При этом из работы сопротивления внешним силам исключается связующее. Это важно не из-за воспринимаемой им доли общей нагрузки, а из-за нарушения одновременности работы волокон и неполного использования их высоких механических показателей. Потеря устойчивости до разрушения также значительно снижает коэффициент использования прочности арматуры. Таким образом, несоблюдение условий монолитности приводит, в конечном счете, к снижению прочности системы. Поэтому для создания высокопрочного ортогонально армированного стеклопластика необходимо исследовать условия его монолитности.

Совмещение волокнистого наполнителя со связующим при формировании изделий из стеклопластиков связано с процессом пропитки пористой волокнистой среды. Сопротивление этой среды, оказываемое течению жидкости, зависит от размеров и геометрии пор, которые, в свою очередь, определяются ориентацией и содержанием волокнистого наполнителя. По размерам можно различать поры трех уровней: между волокнами, между нитями и между слоями; условия их заполнения жидкостью могут быть существенно различными. Однако практически реализуемые скорости пропитки позволяют вместо дифференцированного подхода к оценке пористых сред определить некоторую их интегральную характеристику, называемую проницаемостью, и на базе теории фильтрации сформулировать общий подход к технологическому расчету процесса пропитки.

Монолитность композиционных материалов напрямую зависит от степени пропитки связующим. В работе Трофимова Н.Н. [97] время, необходимое для полной пропитки композита, определяется по формуле

$$t = \frac{\mu f(\delta) k^2 \ln k}{\rho g h + \frac{2\delta \cos \theta}{r_b} \frac{1-\delta}{\delta^2}},$$

где $f(\delta) = 16(1-\delta)^{1,5} \left[1 + 56(1-\delta)^3 \right]$, $k = r_0 / r_b$, r_0 – наружный радиус макронити; r_b – радиус элементарного волокна; h – высота поднятия жидкости в капилляре; δ – пористость; μ – вязкость связующего; θ – угол наклона арматуры к горизонту.

Анализ приведенного соотношения выше показывает, что скорость капиллярного течения связующего весьма низка (2–8 см/мин), а для того, чтобы скорость пропитки была приемлемой с точки зрения производительности процесса, необходимо протягивать ткань со скоростью 2–80 м/мин, т.е. на два-три порядка выше. Это не обеспечивает полную пропитку армирующего материала в ванне, поэтому процесс пропитки на микроуровне начинается только при выходе из ванны, когда под действием гравитационных сил в капиллярах образуются капли, раздвигающие волокна и способствующие образованию радиальных и продольных щелей, куда устремляется связующее. При этом волокна могут быть раздвинуты настолько, что перестают действовать капиллярные силы. В результате процесс пропитки замедляется. Поэтому необходимо иметь такое натяжение волокон, которое сохранило бы стабильную капиллярную структуру наполнителя. В случае стабильности структуры значительно улучшается качество пропитки и, следовательно, увеличивается количество работающих волокон, что в конечном итоге приводит к повышению прочности композита. Кроме того, для улучшения качества пропитки и, следовательно, для повышения прочности композита намотку следует вести с минимально возможным значением вязкости.

Пропитка связующим не заканчивается на стадии получения препрегов. Она продолжается и при намотке оболочек, и на стадии нагревания в процессе термообработки. Очевидно, что при термообработке пропитка связующим армирующего материала должна достигать максимальных значений. Необходимо также отметить,

что для разных связующих и разных армирующих материалов должны быть разными: минимальное значение вязкости и границы натяжения армирующего материала. Для материалов, используемых в производстве, эти цифры установлены, а для новых материалов они должны устанавливаться путем экспериментальных исследований.

Совмещение волокнистого наполнителя со связующим при формировании изделий из композиционных материалов связано с процессом пропитки пористой волокнистой среды. Сопротивление этой среды, оказываемое течению жидкости, зависит от размеров и геометрии пор, которые, в свою очередь, определяются ориентацией и содержанием волокнистого наполнителя. По размерам можно различать поры трех уровней: между волокнами, между нитями и между слоями; условие их заполнения жидкостью могут быть существенно различными. Однако практически реализуемые скорости пропитки позволяют вместо дифференцированного подхода к оценке пористых сред определять некоторую их интегральную характеристику, называемую проницаемостью, и на базе теории фильтрации сформулировать общий подход к технологическому расчету процесса пропитки.

Оценка проницаемости пористой среды обычно проводится в условиях одномерного течения ньютоновской жидкости известной вязкости через пористый образец прямоугольного сечения: Виноградов и др. [96]. Измеряя перепад давления на входе и выходе, а также расход жидкости, можно рассчитать коэффициент проницаемости пористой среды K по следующей формуле

$$K = \frac{Q\mu L}{(p_1 - p_2) b \delta} ,$$

где Q – расход жидкости; μ – вязкость жидкости; L, b, δ – размеры образца; $(p_1 - p_2)$ – перепад давления по длине образца.

В какой-то мере управлять размерами пор можно созданием предварительного натяжения волокон в композиции. Достигаемая в процессе намотки степень уплотнения наполнителя на оправке также определяется его натяжением. Однако натяжение неодно-

значно определяет давление наполнителя на оправку, а, следовательно, и степень его уплотнения. С увеличением радиуса кривизны поверхности давление уменьшается, а на поверхности нулевой кривизны практически отсутствует. Поэтому дополнительное уплотнение наполнителя в процессах намотки, если содержание его строго регламентируется, является необходимым условием формования изделий. С другой стороны, при формовании изделий волокнистый наполнитель, как правило, малоподвижен, а связующее обладает хорошей текучестью. Это требует внимательного подхода к выбору давления формования. Можно переусердствовать до такой степени, что в отдельных местах конструкции связующего будет мало, а в других – излишки. Такое недопустимо, так как получение композиционных материалов только с заданным объемным содержанием наполнителя позволяет прогнозировать их свойства, а также устанавливать параметры технологического процесса формования изделий.

Роль технологического натяжения арматуры при намотке очень велика. Натяжение определяет коэффициент наполнения композиционного материала арматурой, решающим образом влияет на прочность и другие свойства материала даже при не слишком хороших упругих и адгезионных свойствах применяемого связующего. Однако превышение некоторого максимума технологического натяжения приводит к дополнительным повреждениям армирующих волокон при движении по пропиточно-формирующему тракту станка и к появлению участков, не смоченных связующим и создающих неоднородность свойств материала по толщине наматываемой оболочки.

Оптимальное давление контактного формования при намотке, определяемое натяжением наполнителя, позволяет получать максимальную прочность, минимальную пористость и наилучшие сочетания других свойств материала. Оно зависит от типа армирующего полуфабриката и характеристик полимерного связующего. Номинальное значение технологического натяжения армирующего материала, выражаемое в долях разрывной нагрузки применяемой арматуры (P_p), для стеклянных нитей варьируется в пределах 0,12–0,5 от P_p : Калинин [143]. Для стеклоткани натяжение обычно со-

ставляет 0,1–0,4 (P_p). При этом уровень применяемых натяжений органопластиков в 2 раза выше, а при намотке углепластиков и бoroпластиков в 2 раза ниже, чем при намотке стеклопластиков: Калининцев [143]. Таким образом, следует заметить, что оптимальное давление контактного формования при намотке композиционного материала имеет свои определенные границы.

Без обеспечения герметичности стеклопластиков немислимо их применение в ряде отраслей промышленности и новой техники. Поэтому проблема формирования условий, которым должны удовлетворять как исходные элементы композита, так и условия его эксплуатации, для создания герметичной системы весьма актуальна. Между тем при создании изделия или применяется эмпирический подход, или за основу расчета принимаются рекомендации автора работы [95], которые полагают, во-первых, что герметичность системы является функцией лишь деформативности ее элементов и, во-вторых, даже при такой постановке анализ основан на простейших плоских моделях. Такой подход к созданию герметичного материала приводит, с одной стороны, к явно завышенным требованиям к деформативности связующего, а с другой – не учитывает когезионной и адгезионной прочности композита, что приводит к значительным ошибкам, ибо разгерметизация материала может произойти и вследствие потери сплошности связующего или границы раздела арматура-полимерная матрица.

Далее, и это главное, как правило, элементы конструкции должны быть одновременно и герметичными, и несущими, т.е. условия герметичности должны быть построены с учетом требований, предъявляемым к прочностным свойствам материала. В противном случае происходит утяжеление и удорожание конструкции, что связано с необходимостью предусматривать наличие как герметичных, так и несущих слоев.

Сформулируем требования к элементам стеклопластика и к условиям его эксплуатации в аспекте создания герметичной и одновременно достаточно прочной структуры в предположениях, свободных от указанных выше ограничений.

Нарушение сплошности композита происходит вследствие либо потери сплошности, либо нарушения сплошности связующего или

из-за нарушения связи по границе раздела волокно-смола. Условия сплошности описываются системой неравенств [97]

$$\frac{E_c}{E_a} \geq 0,06, \quad \frac{\tau_{адг}}{\sigma_a} \geq 0,04, \quad \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_a} \geq 1,5, \quad \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \geq 0,06, \quad \frac{\tau_c}{\sigma_a} \geq 0,04. \quad (1.1)$$

Из-за существенного различия свойств компоненты стеклопластика разрушаются не одновременно. Поэтому при формулировании условий герметичности необходимо учитывать, какой из компонентов (или контактный слой) разрушается первым. В композитах даже при простых видах нагружения связующее находится в плоском (или объемном) напряженном состоянии, и для оценки его прочности и, следовательно, сплошности совершенно необходимо применение тех гипотез прочности, которые учитывают реальное напряженное состояние.

Как известно, упруго-прочностные свойства композиционных материалов определяются не только упруго-прочностными свойствами их элементов, но и границами раздела волокно-матрица, которые существенно влияют на равнозагруженность и одновременность работы всех волокон. Однако влияние границ раздела, в частности, степени развитости поверхности раздела, т.е. диаметра армирующих элементов, на прочность композита в достаточной мере изучено лишь при испытаниях материала в условиях растяжения [95, 96]; прочность композита при растяжении зависит от диаметра волокна только в том случае, когда поверхность волокна повреждена. При этом изменение прочности прямо пропорционально степени повреждения поверхности арматуры, и, следовательно, прочность падает с ростом диаметра (из-за масштабного эффекта).

При работе композита на сжатие разрушение материала начинается с потери устойчивости армирующих элементов [98–101]. Поэтому их жесткость должна оказывать значительное влияние на прочность композита при сжатии. Известно, что жесткость волокон является степенной функцией их диаметра. Естественно поэтому предположить, что прочность при сжатии существенным образом зависит от диаметра. Действительно, имеет место следующее уравнение регрессии [100]

$$\sigma_{сжс} = 115 + 11,5d + 46E_a E_c + 7,75\tau_{адг},$$

т.е. прочность композита линейно связана с диаметром. Здесь E_a и E_c – модули упругости арматуры и связующего; d – диаметр волокна.

Это было подтверждено результатами исследования устойчивости модели стеклопластика, в которой нагрузка непосредственно прикладывается лишь к среднему элементу, а крайние вовлекаются в работу через связующее. Была получена линейная связь между $\sigma_{сжс}$ и d [102].

Исследований влияния диаметра на сдвиговую прочность композита τ очень мало, несмотря на актуальность этой проблемы. Поэтому интересно хотя бы в первом приближении оценить связь между d и τ . Пусть удельная поверхность раздела характеризуется некоторой величиной $a = \Pi / S$, где Π – периметр всех границ раздела волокно-матрица [102–104]. Если n – число волокон, а F – относительное содержание арматуры, то

$$\Pi = \pi dn, \quad S = \frac{nd^2\pi}{4F}.$$

и с учетом написанных выше соотношений

$$a = 4F / d.$$

Очевидно, что с увеличением поверхности раздела, которая характеризуется «плотностью границ» a , вероятность появления дефектов возрастает, и, следовательно, можно ожидать понижения сдвиговой прочности композита. Это предположение было экспериментально подтверждено при испытаниях кольцевых однонаправленных сегментов на межслоевой сдвиг.

Если гексанальная и квадратная укладки волокон в матрице равновероятны, то

$$F = \frac{0,846}{(1 + \delta / d)^2},$$

где δ – минимальное расстояние между волокнами.

Поскольку в реальных конструкционных стеклопластиках $\delta/d \ll 1$, то $(1 + \delta/d)^2 \approx 1 + 2\delta/d$, и с учетом приведенных выше соотношений $a \approx 3,364(d + 2\delta)^{-1}$, т.е. в первом приближении можно считать, что величина a обратно пропорциональна d .

1.9. Упругие прочностные свойства ориентированных стеклопластиков

В отличие от металлов стеклопластики не обладают пределом текучести. Прочность стеклопластиков более существенно, чем металлов, зависит от многих факторов, характеризующих процесс его испытаний (форма и размеры образца, метод его получения, скорость нагружения, температура, время выдержки под нагрузкой, число нагружений и их уровень, схемы и режимы нагружения, наличие предварительного испытательного нагружения, внешняя среда и др.). Следовательно, при испытании различных образцов одного и того же стеклопластика на различных машинах и образцах могут получиться несопоставимые результаты.

Важнейшими из перечисленных факторов являются температура и скорость нагружения. В зависимости от их значений материал может испытывать упругие, высокоэластические или необратимые пластические деформации. При очень быстрых (мгновенных) нагрузках проявляется чистая упругая деформация, а при очень медленных – пластическая. Поэтому прочность стеклопластика, т.е. способность сопротивляться разрушению или необратимому деформированию, можно понимать как сопротивление хрупкому разрыву или пластической деформации.

Широкая область упругого деформирования композиционных материалов обуславливает и специфику процесса их разрушения, которое происходит как бы внезапно, в то время как металл, прежде чем разрушиться, пластически деформируется. Связано это в основном с гетерогенностью структуры композиционных материалов, специфичностью поведения под нагрузкой стекловолокна и полимерного связующего, а также с наличием неизбежных макро дефек-

тов структуры в виде пор, трещин, газовых и инородных включений, и самой границы раздела волокно – связующее. Кроме этих концентраторов напряжений в материале существует определенный уровень остаточных напряжений, возникших главным образом вследствие усадки связующего при отверждении.

Структура стеклопластиков определяется в основном видом, соотношением размеров армирующих элементов и расположением их в полимерной матрице. Механические характеристики стеклопластиков, в свою очередь, определяются главным образом арматурой, поэтому влияние структуры композита на его упруго-прочностные свойства не вызывает сомнения. Однако исследования показывают, что структура оказывает определенное влияние также на теплофизические, светотехнические, радиотехнические, электротехнические и другие свойства композитных материалов. Это относится прежде всего к ориентированным стеклопластикам, свойства которых можно широко варьировать изменением структуры за счет изменения как типа армирующего материала, так и схемы его ориентации.

Как уже упоминалось, в зависимости от расположения армирующих элементов можно выделить три основные группы материалов: одно-, двух- и трехмерноармированные; их называют также однонаправленными, слоистыми и пространственно-сшитыми [105, 106].

Если в качестве армирующего материала используются волокна, уложенные параллельно друг другу, то композит имеет однонаправленную структуру и является трансверсально-изотропным материалом в плоскостях, перпендикулярных направлению армирования. При получении стеклопластика слоистой структуры в качестве армирующего материала используют ровинги, нетканые армирующие материалы, а также ткани различного переплетения. Слоистые композиты могут быть ортогонально армированы с различным соотношением продольных и поперечных слоев арматуры, т.е. ортотропными в осях, совпадающих с направлениями армирования. Волокна могут быть уложены и под другими произвольными углами. В зависимости от числа направлений армирования в слое материал называют двух-, трех- и n – направленным. При достаточно большом n имеем материал с так называемым всеерным армированием. Материалы третьей группы, пространственно-

сшитые, получают на основе многослойных или так называемых объемных тканей. Такие композиты называют трехмерно-армированными структурами [107, 108].

Таким образом, все ориентированные стеклопластики однонаправленные, слоистые и трехмерно-армированные имеют регулярную структуру, а, следовательно, обладают четко выраженной анизотропией упругих и прочностных свойств.

Из рассмотренных условий сплошности наиболее полно учитывают взаимосвязь свойств исходных компонентов уравнения (1.1). Для получения высокопрочного композита обязательно выполнение всех условий сплошности, между тем как выбор армирующих материалов, связующих и аппретирующих систем довольно ограничен и не всегда позволяет в полной мере выполнить все эти условия. В связи с этим особую важность приобретает оценка одновременного влияния всех существенных переменных факторов на прочность стеклопластиков при различных видах нагружения. Это позволяет выделить главные параметры исходных компонентов, вносящие наибольший вклад в формирование высокопрочной структуры.

Изучение влияния всех факторов на прочность стеклопластиков – задача исключительно сложная. Поэтому, исходя из современных представлений о механизме разрушения, можно предположить, что основными параметрами, влияющими на прочность композита, являются прочность и жесткость (модуль упругости и диаметр) арматуры, модуль упругости связующего и его деформативность, прочность связующего при растяжении и сдвиге, а также адгезионная прочность системы.

Для надежного прогнозирования прочности композита необходимо оценивать степень приближения параметров связующего к условиям сплошности (1.1). Прочность и сплошность взаимосвязаны. Если нарушаются условия сплошности, то наступает разрушение материала и наоборот. Вопрос прогнозирования прочности материалов не является новым. Довольно широко применяется метод прогнозирования прочности композита на основе закона смеси. Однако в этом случае свойства связующего, а также явления на границе раздела не учитываются, и прочность армированной системы рассчитывается, исходя из прочности арматуры.

Обычно при входном лабораторном контроле компонентов измеряют прочность элементарного стекловолокна, разрывную нагрузку стеклонити, жгута, ленты, полоски ткани, а также прочность на изгиб блочного образца отвержденного связующего. Испытания стеклопластика проводят на растяжение, сжатие, изгиб, адгезионный отрыв и сдвиг. Проводится также контроль стеклопластика на содержание наполнителя, степень отверждения связующего, пористость, плотность, осуществляются и некоторые другие испытания, в частности, усталостные и климатические, в зависимости от особенностей эксплуатации конструкции.

1.10. Анизотропия свойств материала композита и ее регулирование

В общем случае пространственную анизотропию упругих свойств ориентированного стеклопластика в осях ортогональной симметрии можно характеризовать девятью независимыми постоянными упругости: тремя модулями упругости E_x , E_y , E_z , тремя коэффициентами Пуассона ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{zx} (первый и второй индексы указывают соответственно направления продольной и поперечной деформации) и тремя модулями сдвига G_{xy} , G_{yz} , G_{zx} (рис.1.7).

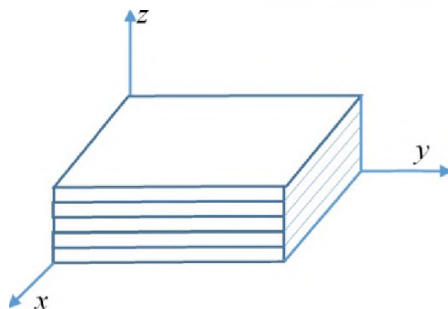


Рис.1.7. Расположение координатных осей в анизотропной пластине

Если материал изотропен в плоскости xy , то он может быть охарактеризован пятью независимыми постоянными упругости: E_x , E_z , ν_{xy} , ν_{xz} , G_{xz} . Остальные постоянные упругости определяются равенствами

$$E_y = E_x; \quad G_{yz} = G_{xz}; \quad G_{xy} = \frac{E_x}{2(1 + \nu_{xy})};$$

$$E_x \nu_{xz} = E_z \nu_{zx};$$

$$\nu_{yz} = \nu_{xz}; \quad \nu_{zy} = \nu_{zx}; \quad \nu_{yx} = \nu_{xy}.$$

На примере стеклопластиков типа СВМ можно наблюдать зависимость упругих характеристик композита от его структуры, определяемой количеством арматуры, уложенной в каждом направлении. Это позволяет за счет изменения вида армирующего материала и схемы его ориентации регулировать анизотропию упругих свойств стеклопластика.

При сравнении стеклопластиков на основе тканей Т-11 заметно влияние типа полимера на значения констант упругости, особенно модулей сдвига.

Экспериментальное определение упругих свойств весьма трудоемко, поэтому данные об анизотропии механических свойств стеклопластиков имеются лишь для ограниченного круга материалов. В первую очередь нужно отметить работы Е.К. Ашкенази [105, 109, 110], в которых информация об анизотропии упругих свойств материалов представлена в виде пространственных диаграмм или поверхностей, что позволяет определить константы упругости при заданном направлении усилия не только в плоскости xy , но и в плоскости xz .

Содержание наполнителя также является важнейшим фактором, влияющим на прочность и модуль упругости композита. Исходя из того, что основную нагрузку несет арматура, а ее упругопрочностные характеристики почти на полтора порядка выше, чем у матрицы, можно было бы предположить, что увеличение содержания наполнителя вплоть до теоретического предела (90 % объемных) будет при-

водить к росту прочности и жесткости стеклопластика. Однако это не всегда наблюдается на практике. Существует определенное оптимальное содержание, которое зависит от используемых компонентов, вида деформации, профиля поперечного сечения арматуры, условий эксплуатации и т.д. Армирующему материалу каждого типа соответствует его оптимальное содержание, обеспечивающее максимальную прочность композита [111]. Это объясняется тем, что для получения стеклопластика с высоким содержанием арматуры требуется применение больших давлений. Однако чрезмерно высокое давление разрушает наполнитель и ослабляет материал.

А.К. Буровым и Г.Д. Андреевской было установлено [112, 113], что в стеклопластике типа СВМ оптимальное объемное содержание волокон составляет 65 %; при увеличении содержания волокон прочность и модуль упругости падают, очевидно, вследствие недостатка связующего для образования сплошной полимерной пленки между волокнами. Такой же вывод был сделан для стеклопластиков на эпоксидном связующем [114].

В ряде работ [115–117] отмечалось, что максимально достижимое содержание волокон для однонаправленного стеклопластика составляет 75 % (объема). Между тем на примере стеклопластика однонаправленной структуры с диаметром волокна 9–11 мкм было показано [118], что с увеличением содержания волокна упругопрочностные характеристики композита при растяжении непрерывно растут и какого-либо максимума, после которого прочность начала бы падать, не наблюдается. При этом было достигнуто содержание наполнителя, близкое к теоретическому пределу. В исследованном диапазоне прочность и модуль упругости стеклопластика при растяжении подчинялись закону смеси [119]

$$R_{cn} = R_a c_a + R_c (1 - c_a),$$

$$E_{cn} = E_a c_a + E_c (1 - c_a),$$

где c_a – относительное содержание арматуры.

1.11. Свойства конструкционных материалов в условиях эксплуатации

Для успешного применения стеклопластиков в различных конструкциях необходимо знать предельные значения физико-механических характеристик с учетом разброса этих значений и возможные изменения этих характеристик при воздействии эксплуатационных факторов.

Предельные (стандартные) значения наиболее важных характеристик стеклопластиков приводятся в ГОСТ и ТУ на эти материалы или могут быть определены путем стандартных испытаний. Влияние эксплуатационных факторов можно учесть путем умножения предельного значения характеристики X на коэффициенты условий работы материала $m_i = X_i / X$, где X_i – значение выбранной характеристики после воздействия эксплуатационного фактора.

В общем случае коэффициент условий работы должен учитывать понижение или повышение предельного значения характеристики в условиях воздействия низких или высоких температур, силового, вибрационного и акустического полей, облучения, вакуума, агрессивных сред и других эксплуатационных факторов в определенном временном интервале [120, 121]

$$m = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_n.$$

Следует отметить, что значение m_i при комплексном воздействии нескольких факторов может заметно изменяться по сравнению с отдельным действием этих факторов. Для оценки одновременного влияния нескольких факторов необходим специальный подход к планированию эксперимента и обработке его результатов [122].

Агрессивные среды в зависимости от процессов, протекающих в материале, можно разделить на физически и химически агрессивные. Первые вызывают обратимые изменения в материале, не сопровождающиеся разрушением химических связей. Химически агрессивные среды в отличие от физически агрессивных вызывают необратимые изменения химической структуры полимера. Специ-

фическое влияние оказывают поверхностно-активные среды, понижающие поверхностную энергию твердого тела, что способствует появлению разнообразных дефектов при меньших внешних усилиях [123]. Воздействие физически агрессивных сред часто сопровождается необратимыми процессами, например, вымыванием низкомолекулярных продуктов.

Процесс переноса среды в полимере осуществляется как по механизму активированной диффузии, обусловленному тепловым движением сегментов макромолекул и градиентом концентрации, так и по механизму субмикрокапиллярного потока, обусловленного наличием в стеклопластике пор, трещин и других факторов.

В результате диффузии среды в полимер происходит его пластификация, вымывание примесей, непрореагировавших при отверждении мономеров и продуктов распада, а также деструкция или структурирование. При этом среда проникает также на границы раздела стекло–связующее, вызывая ослабление адгезионных связей и отделение волокна от связующего. В дальнейшем может происходить также коррозия стеклянного волокна с образованием щелочных продуктов, вызывающих омыление связующего.

Среда, проникая через поры и другие микродефекты, число которых обычно возрастает с увеличением содержания волокон, прежде всего вызывает ослабление связи между стеклом и связующим, отделение волокна от связующего и рост трещин.

1.12. Адгезионные свойства композитов

Важнейшее место при создании конструкционных композитов занимают вопросы адгезии. Адгезией называют прилипание или связь между приведенными в контакт разнородными поверхностями. В стеклопластиках поверхность волокнистой арматуры очень развита, и поэтому, чем прочнее сцепление между стеклянными волокнами и полимерным связующим, тем выше прочность композиционного материала. Существует достаточно много теорий, так или иначе объясняющих природу адгезии. Остановимся на основных из них [124–128].

В некоторых случаях существенную роль играет механическая адгезия [128]. Согласно этой концепции, адгезия осуществляется в результате затекания адгезива в поры и трещины поверхности субстрата

и последующего отверждения в них. Однако только этим нельзя объяснить все случаи склеивания, так как хорошо склеиваются и некоторые совершенно гладкие поверхности. Поэтому предложена концепция адгезии, обусловленной химическим взаимодействием [129] между молекулами почти всех полимеров, содержащих активные функциональные группы, и поверхностями металлов, стекол и т.д. могут возникать химические связи, в особенности, если поверхности покрыты оксидной пленкой или слоем продуктов эрозии.

Исходя из того, что, во-первых, химическая связь образуется только при достижении очень небольших расстояний между контактирующими телами и их функциональными группами, во-вторых, химическое взаимодействие между адгезивом и субстратом вследствие их обычно инертной природы вообще маловероятно, и в-третьих, один и тот же адгезив может склеивать различные материалы. Дебройн [130] разработал молекулярную теорию адгезии. Согласно молекулярной теории, адгезия обусловлена действие вандер-ваальсовых сил (дисперсионных сил, сил взаимодействия между постоянными или между постоянным и наведенными диполями), взаимодействием ион-диполь и образованием водородных связей.

Молекулярная теория наиболее полно отражает сущность природы адгезии, но это, конечно, не означает, что такую сложную проблему можно свести к проявлению только одного фактора – молекулярного взаимодействия. Определенную роль в адгезионных системах играют и такие явления, как электризация поверхностей, а также поверхностная и объемная диффузии. Авторы работы [131] Дерягин и Кротова основывают электрическую теорию на явлениях контактной электризации, происходящей при тесном соприкосновении двух диэлектриков или металла и диэлектрика. При этом система адгезив-субстрат ассоциируется с конденсатором, а двойной электрический слой, возникающий при контакте двух разнородных поверхностей, - с обкладками конденсатора. Работу адгезии в этом случае приравнивают к энергии конденсатора. Однако теория не может удовлетворительно объяснить образование адгезионной связи между телами, близкими по своей природе, а также неполярными телами при использовании инертных наполнителей.

Согласно диффузионной теории [132] адгезия представляется как объемное явление, т.е. адгезия обуславливается межмолекуляр-

ными силами, а диффузия цепных молекул или их сегментов обеспечивает максимально возможное для каждой системы взаимоприкосновение макромолекул, что способствует увеличению молекулярного контакта.

Из сказанного выше ясно, что природа адгезии на поверхности раздела определяется, по крайней мере, тремя типами связей – химическими, водородными и физическими. Количественно адгезию можно охарактеризовать величиной адгезионной прочности или удельной работы адгезии. В первом случае она оценивается напряжением, необходимым для разделения двух склеенных поверхностей, во втором – работой, необходимой для этого.

Для большинства реально существующих соприкасающихся тел возникновение химической связи маловероятно без создания специальных условий: наличия свободных реакционных центров, обладающих химическим сродством друг к другу, а также наличия непосредственного контакта между реакционноспособными частями молекул, вероятность которого, с учетом микрошероховатости межфазной поверхности, зависит, в свою очередь, от молекулярного взаимодействия. Физическое (или ван-дер-ваальсово) взаимодействие универсально и существует между любыми контактирующими телам.

Как известно, водородная связь возникает между двумя электроотрицательными атомами через атом водорода, который валентно связан с одним из электроотрицательных атомов и одновременно взаимодействует с неподеленной парой другого. Работ, посвященный изучению водородных связей методами квантовой химии, сравнительно немного. Причем в основном исследуются небольшие объекты [133, 134]. Однако рассматриваются и более крупные объекты с использованием кремнезема [135].

Механическими методами адгезионная прочность может определяться при отрыве, когда возникают нормальные (перпендикулярные к плоскости склейки) напряжения, и при сдвиге, когда возникают касательные (тангенциальные) напряжения. Однако для системы волокно-связующее использовать метод отрыва не удастся, так как определить адгезионную прочность при отрыве волокон, склеенных в торец, практически невозможно, а при отрыве волокон, склеенных крест накрест, нельзя точно определить площадь контакта.

Наиболее распространённым методом измерения адгезионной прочности является вырывание волокон из отливки смолы. Результаты испытания соответствуют либо нагрузке в момент разрыва (растяжение), либо нагрузке в момент вытягивания волокон из матрицы (сдвиг). Другой метод определения адгезионной прочности на поверхности раздела основан на измерении усилия, необходимого для выталкивания диска из материала матрицы вдоль оси волокна. В начале движения усилие увеличивается линейно и затем достигает максимального значения, соответствующего наибольшей прочности адгезионной связи поверхности раздела. В обоих методах адгезионное соединение возникает на поверхности стекловолокна, погруженного в слой адгезива. При разрушении образцов измеряют силу F , необходимую для вырывания волокна из слоя адгезива, а затем рассчитывают адгезионную прочность

$$\tau_{адг} = F / S ,$$

где $S = \pi dl$ – площадь контакта волокна с адгезивом (l – толщина слоя полимера, d – диаметр волокна).

С учетом сказанного видно, что при выдергивании стекловолокна из слоя полимера приходится преодолевать как минимум две силы – силу адгезионного взаимодействия и силу трения, которая возникает в результате действия разного рода напряжений на поверхности раздела. Вопрос о том, какой из этих факторов преобладает, до сих пор остается нерешенным.

С другой стороны, в течение длительного времени полагали, что разрыв материала наступает только тогда, когда напряжение достигает некоторого предельного критического значения, которому и соответствует показатель адгезионной прочности материала, и что при меньших напряжениях разрушения не происходит. Это неверно, так как все материалы при длительном воздействии внешних сил разрушаются при напряжениях, которые значительно ниже напряжений, возникающих при быстром воздействии силы. Это обстоятельство, как известно, легло в основу теории температурно-временной зависимости прочности твердых тел, согласно которой основной характеристикой сопротивления материала статическому напряжению является меха-

ническая долговечность (τ) – время от момента приложения постоянного напряжения до момента разрушения образца. Как показали исследования Журкова, температурная зависимость долговечности для твердых тел и полимеров, структура которых не изменяется в процессе деформации, описывается следующим образом

$$\tau = \tau_0 \exp \left\{ \frac{-(U - \gamma\sigma)}{RT} \right\},$$

где U – энергия активации элементарного акта разрушения, равная энергии химической связи; γ – коэффициент, зависящий от природы и структуры материала; σ – напряжение, характеризующее часть работы, которую выполняют внешние силы при разрыве тела (или, другими словами, адгезионная прочность); R – постоянная Больцмана.

При исследовании влияния поверхностной обработки на несущую способность стеклопластиков чрезвычайно сложно исключить влияние неконтролируемых факторов: степень пропитки полимерным материалом, структуры наполнителя, степени повреждаемости волокна и др. К тому же реальные композиты представляют собой, по существу, некоторую регулярную или хаотически расположенную систему заполненных наполнителем трещин, а разрушение композита определяется в основном процессом их зарождения и развития, т.е. определяя значение адгезионной прочности материала, мы изучаем следствие, а не причину разрушения композита.

Таким образом, определяемая описанными выше методами адгезионная прочность не идентична прочности адгезионных связей. Первый термин отражает все силы, действующие на границе раздела: силы физико-химического взаимодействия и силы трения, вызываемые напряжениями в адгезиве и волокне. Совокупность этих сил существенно зависит от геометрии образца, от имеющегося в нем поля напряжений и характеризует не данную пару, например, стекло-волокно–связующее, а данное соединение этой пары. Второй термин отражает только физико-химическое взаимодействие на границе раздела фаз. Следовательно, при изучении адгезии представляется целесообразным использование более универсальной характеристики величин адгезионной связи. В качестве последней может быть ис-

пользована энергия пар аппрет–стекловолокно, аппрет–связующее и связующее–стекловолокно. Под энергией взаимодействия мы понимаем весь комплекс химических, водородных и физических (или ван-дер-ваальсовы) связей, возникающих на границе раздела фаз.

Очевидной выгодой такого рассмотрения энергии взаимодействия пар компонентов композита как характеристики адгезионной связи является то, что мы имеем возможность, представив эти составляющие равноправными «партнерами» в создании адгезионной связи, сформулировать требования к энергии образуемых ими связей с точки зрения получения монолитного материала.

1.13. Оптимизация технических и технологических параметров – основа создания качественных изделий из композита

Приступая к производству оболочек, приходится решать множество задач, включая учет чисто технологических особенностей метода намотки, конструктивных особенностей создаваемого изделия и эксплуатационных характеристик получаемого материала в конструкции. Многоплановость решения этих задач связана не только с необходимостью учета большого числа разнообразных, порой противоречиво проявляющихся факторов, но и с потребностью нахождения компромиссных вариантов, проведения ряда последовательных итерационных расчетов, экспериментального исследования получаемого материала, анализа результатов испытаний модельных и натуральных образцов конструкции.

Совместное влияние большого количества структурно-технологических факторов на механические характеристики материала делает недостаточным дифференцированное изучение зависимости прочности от отдельных параметров структуры, а ставит перед технологом задачу оптимального их соотношения, позволяющего обеспечить максимальные прочностные показатели композиционного материала в готовом изделии. Таким образом, чтобы обеспечить необходимую прочность оболочек, конструктор, принимая в расчет материал с некоторыми конкретными физико-механическими свойствами, должен учитывать, что заданные (расчетные) физико-механические свойства могут изменяться в определенных пределах. Эти изменения определяются технологическими

допусками, лимитирующими соответствующие производственные погрешности, которые складываются обычно из погрешностей систематического и случайного характера.

К систематическим погрешностям относятся, например, объемная плотность, коэффициент равномерности натяжения элементарных волокон, угол намотки, относительная толщина текстурных слоев материала, угол между семействами нитей. Поскольку закон систематических погрешностей и их физическая сущность известны, технологу легко определить их количественное значение и знак допустимого отклонения. Следовательно, при определении суммарной величины систематических погрешностей некоторые из них будут компенсировать друг друга.

Кроме того, при формировании оболочек действует большое количество случайных факторов, закономерность и влияние которых на прочностные показатели готовых материалов неизвестны (например, колебания температуры и влажности атмосферы цеха и др.), или, известны закономерности влияния, но неизвестно время вступления в процесс и выключение из него этих факторов, в результате чего совокупное действие последних носит случайный характер. Желая упростить технологические условия выполнения операций производства изделий и снизить трудоемкость их изготовления, идут по пути увеличения области рассеяния действительных размеров относительно заданного допуска.

Прочностные, физические и многие специальные свойства определяются главным образом прочностью исходных волокон или арматуры в целом, природой и свойствами связующего и в очень сильной степени относительным содержанием волокон арматуры и связующего, которое задано конструктором в виде структурного параметра объемной плотности. Если плотность и физическая природа компонента связующего контролируются еще на стадии подготовки ткани и связующего к запуску в производство, то два других фактора обеспечиваются уже непосредственно на стадиях технологического процесса изготовления конструкции. При этом самым ответственным этапом технологии является операция формирования изделия, ибо здесь технологически совмещено решение двух задач: формирование заданной конструктором структуры оболочки и формирование изделия с требуемым качеством и точностью

геометрических форм и размеров. Таким образом, установление критериев и параметров, по которым следует настраивать и выдерживать технологический процесс формования изделия, является задачей весьма ответственной и важной. С точки зрения обеспечения величин физико-механических свойств готового материала, прочности и надежности конструкции изделия всегда стоит задача контролирования заданных конструктором следующих структурных параметров: объемной плотности, коэффициента равномерности натяжения элементных волокон, угла намотки, угла между семействами нитей, относительной толщины текстурных слоев материала и их пределы изменения.

Анализ накопленного научно-производственного опыта позволяет дифференцированно подойти к новым разработкам, представляя их как совокупность последовательно решаемых задач, начиная от анализа технических требований к изделию и заканчивая технологическим регламентом испытаний и аттестацией готовых изделий. Если в сжатой и упрощенной форме попытаться представить последовательность действий инженера, которому поставлена задача, например, создания конструкции торовой оболочки, удовлетворяющей заданным эксплуатационным требованиям, то в общем виде она может быть представлена следующим образом.

1. Установление основных технологических параметров, обеспечивающих качественную намотку цилиндрической оболочки.
2. Выбор тех технологических параметров, которые изменяются в процессе превращения цилиндрической оболочки в торовую.
3. Корректировка и уточнение количественных размеров этих параметров при намотке цилиндрической оболочки.

Как видно из представленной схемы, проведению этих работ должны предшествовать теоретические исследования, расчетные и проектные работы, а также эксперименты, проводимые на образцах и моделях.

Задача, поставленная для решения в настоящей работе, сводится не к установлению всех технологических параметров, а только тех, которые должны быть определены и могут влиять на качество при намотке конструкций, точнее, тех параметров, которые изменяются в процессе трансформации оболочки в состоянии препрега. Корректировка этих параметров в исходном состоянии должна производиться с целью восстановления их опти-

мального влияния на качественные и количественные стороны режима формования для получения проектной структуры композиционного материала. Это, несомненно, нужно сделать, так как отклонение структурных параметров материала неизбежно вызовет соответствующие изменения его физико-механических и специальных свойств. Рассмотрение всех процессов, происходящих при трансформации оболочки, приводит к выводу, что изменяются в количественном отношении следующие величины: время изготовления изделия в сторону увеличения; натяжение в нитях армирующего материала; давление формирующего материала на оправку; степень наноса связующего на армирующий материал. Все эти параметры в той или иной мере влияют на монолитность материала в состоянии препрега.

1.14. Обеспечение жизнеспособности связующего при изготовлении изделий из армированных пластиков

Развитие промышленного производства композитов невозможно без широкого внедрения и совершенствования технологии изготовления изделий из полуфабрикатов, в частности, препрегов. При этом к полимерным связующим предъявляются дополнительные требования технологического характера, основными из которых являются сочетание длительной жизнеспособности при температуре хранения с достаточно высокими реакционными способностями при температурах переработки.

При хранении препрегов в связующих протекают два взаимосвязанных процесса: химическое структурирование, т.е. образование сетки химических связей, и физическое структурирование, т.е. образование сетки физических связей. Наиболее часто жизнеспособность связующих отождествляют со временем гелеобразования (t_g). Именно в момент гелеобразования связующие теряют текучесть, в результате чего резко снижается их способность к дальнейшей переработке.

Очевидно, что предельная величина t_g является верхним пределом жизнеспособности полимерной композиции и зависит от процесса химического структурирования полимера, т.е. образо-

вания в нем сетки химических связей. На практике препреги теряют способность к дальнейшей переработке задолго до достижения верхнего предела жизнеспособности из-за существенного повышения вязкости связующего вплоть до перехода в стеклообразное состояние. Время, за которое достигается максимальное значение вязкости, следует считать технологической жизнеспособностью. Технологическая жизнеспособность связующих обусловлена критическим явлением затвердевания, т.е. появлением в полимере сетки физических связей.

При переработке препрегов связующее, очевидно, должно быть таким, чтобы оно способствовало достижению минимального значения внутренней силы трения при скольжении между собой армирующего материала. Отсюда вытекает необходимость повышения жизнеспособности связующего. Это необходимо делать по двум причинам: из-за увеличения периода изготовления изделий и из-за необходимости иметь связующее с минимальной вязкостью в процессе работы с препрегами.

Существуют разнообразные методы повышения жизнеспособности связующих. Так, например, регулируется реакциспособность подбором всех компонентов связующего, а также при необходимости вводятся катализаторы, ускорители или ингибиторы (замедлители). Наполнители при изготовлении композитов иногда могут играть роль ингибиторов. Наличие воды в компонентах связующего и наполнителях также приводит к снижению реакциспособности связующих, как и присутствие растворителей и реактивных пластификаторов. Важной проблемой в химии эпоксидов является необходимость сочетания быстрого отверждения эпоксидных композиций с ее высокой жизнеспособностью при хранении. Частично эта проблема решается путем замены катализаторов на латентные ускорители (УА-605/2-5, А-30-1,5, блок-полиизоцианаты, И-120У), которые имеют разную температуру активации и позволяют получать связующие не только с достаточно длительным сроком хранения, но и значительно сокращают время полимеризации при температуре активации. Одни смолы имеют длительный цикл отверждения, другие – короткий, поэтому для получения связующего с заданными сроками жизнеспособности разрабатываются модифицированные систе-

мы. Например, изменение свойств связующих, в частности, свойства «жизнеспособности» проводится с использованием системы на основе эпоксидных соединений, называемых в промышленности «смолами», представляющими собой ароматические, гетероциклические и циклоалифатические мономеры с повышенной удельной функциональностью или смеси мономеров с примесью олигомерной фракции или с использованием отвердителей других классов. Для композиций на основе эпоксидных полимеров марок ЭД-16, ЭД-10 и эпуров на их основе с отвердителем - продуктом конденсации анилина с формальдегидом используется метод отдельного нанесения смоляной и отверждающей части на различные слои армирующего материала с последующим их объединением-чередованием в процессе формования изделий (метод РНК). Имеются и другие методы повышения жизнеспособности связующих. Однако необходимо отметить, что управление жизнеспособностью может привести к изменению других свойств связующего, иногда даже в нежелательную сторону. Поэтому управление жизнеспособностью связующих основывается на решении оптимизационной задачи с учетом реальных условий изготовления инженерного объекта.

Одним из способов управления жизнеспособностью связующего являются работы, проведенные на предприятии ОАО «Авангард» г. Сафоново [136]. В этом случае поставленной технической задачей являлась разработка эпоксидных связующих ангидридного отверждения с увеличенной жизнеспособностью при температуре переработки (40-60)°С в процессе пропитки армирующих наполнителей с высокой реакционной способностью на стадии отверждения. Также предполагалось, что стеклопластики, органопластики, ба-зальтопластики и углепластики на основе этих связующих должны обладать высокой теплостойкостью при сохранении высоких значений прочностных характеристик. Для решения поставленной задачи было предложено использовать вместо традиционного ускорителя УП-606/2 в качестве латентной иницирующей системы новый капролактам-цинковый комплекс (И-120У) с общей формулой $(\text{CH}_2)_5\text{CONH}\cdot 1,5\text{ZnCl}_2$.

Путем экспериментальной обработки было установлено, что оптимальным соотношением для получения инициатора И-120У с

необходимыми параметрами являются: на 100 весовых частей (в.ч.) капролактама добавляется (90÷100) в.ч. хлористого цинка и (20÷25) в.ч. воды.

Оптимальная вязкость связующих для «мокрой» намотки изделий и для изготовления препрегов на практике составляет по вискозиметру ВЗ-1 (1÷3)^{°Е} в градусах Энглера. Именно такие значения вязкости связующих эффективны для пропитки тканей различной структуры при изготовлении препрегов. В этом случае связующее легко проникает в межленточное пространство тканевых наполнителей и хорошо смачивает волокна. В таблице 1.8 перечислены рецептуры связующих, проверенные в различных условиях. Первая и вторая рецептуры – традиционные связующие, изготовленные с использованием ускорителя УП-606/2. Остальные изготовлены путем замены ускорителя УП-606/2 на капролактама-цинковый комплекс И-120У.

Таблица 1.8

Составы эпоксидных связующих. Их теплофизические и технологические свойства.

№ п/п	Наименование и содержание компонентов, м.д. (массовые доли)		Теплостой- кость по Мартенсу, °С	Вязкость связующего при температуре, °С в градусах Энглера °Е					Время желати- низации при 160°С, с
				20	30	40	50	60	
1	2		3	4	5	6	7	8	9
1	Прототип ЭД-20 100 изо-МТГФА 82 УП 606/2 0,6		121	исходное					265
				9,0	2,8	1,2	–	–	
				через 2 часа после изготовления					
				42,0	17,9	14,4	11,7	10,9	285
2	Прототип ЭД-20 100 изо-МТГФА 75 УП 606/2 4		123	исходное					77
				9,6	3,2	1,5	–	–	
				через 3 суток хранения при 20°С					
				–	7,3	3,9	0,2	–	115
3	ЭД-20 100 изо-МТГФА 85 И-120У 4,4 ЭФГ 10		123	исходное					107
				–	1,92	0,92	0,74	0,55	
				через 3 суток хранения при 20°С					
				–	6,11	2,30	1,20	0,64	117
4	ЭД-20 100 изо-МТГФА 85 И-120У 4,4 ЭФГ 20		110	исходное					170
				1,7	–	–	–	–	
				через 3 суток хранения при 20°С					
				3,5	–	–	–	–	205
5	ЭД-20 100 изо-МТГФА 85 И-120У 10 ПЭФ-3А 10		103	исходное					117
				–	3,7	1,6	0,9	0,55	
				через 3 суток хранения при 20°С					
				–	–	8,1	2,3	1,8	124
6	ЭД-20 100 изо-МТГФА 85 И-120У 4 ПЭФ-3А 20		92	исходное					120
				–	6,4	2,0	1,4	0,8	
				через 3 суток хранения при 20°С					
				–	–	13,2	5,0	2,4	97

Окончание табл. 1.8

1	2		3	4	5	6	7	8	9
7	ЭД-20	100	103	исходное					
	изо-МТГФА	75		6,0	2,7	1,3	0,7	0,5	107
	И-120У	4		через 3 суток хранения при 20°C					
	МГФ-9	10		–	7,4	2,4	1,1	0,8	120
8	ЭД-20	100	110	исходное					
	изо-МТГФА	75		7,0	3,5	2,1	–	–	170
	И-120У	4		через 5 часов выдержки в термо-шкафу при 40°C					
	Оксилин-5	10		–	–	2,7	–	–	161
9	DEN-438	100	149	исходное					
	изо-МТГФА	80		–	–	8,5	3,9	1,8	75
	И-120У	4							
10	DEN-438	100	150	исходное					
	изо-МТГФА	100		–	–	6,8	1,8	–	113
	И-120У	4		через 6 часов выдержки в термо-шкафу при 50°C					
	ЭФГ	8		–	–	13,2	5,0	2,4	97
11	DEN-438	100	120	исходное					
	изо-МТГФА	100		7,8	2,4	1,6	–	–	240
	И-120У	4							
	ЭФГ	20							
12	DEN-438	100	135	исходное					
	изо-МТГФА	80		–	8,6	5,4	3,3	1,7	66
	И-120У	4							
	ПЭФ-3А	10							
13	DEN-438	100	136	исходное					
	изо-МТГФА	80		–	15,6	7,6	5,8	1,3	190
	И-120У	4		через 4 часа выдержки в термо-шкафу при 60°C					
	Оксилин-5	10		–	–	–	–	5,1	–
14	DEN-438	100	120	исходное					
	изо-МТГФА	80		–	13,0	6,3	2,9	2,1	206
	И-120У	4							

Связующие с указанными в таблице рецептурами были применены для изготовления стеклопластиков методами «сухой» и «мокрой» намоток. Из полученных стеклопластиков были испытаны образцы для определения механических показателей. Результаты испытаний образцов на основе стеклоткани Т-13 представлены в таблице 1.9.

Таблица 1.9

Механические показатели стеклопластиков

Наименование показателей	Номер связующего согласно таблице								
	№2	№3	№5	№7	№8	№9	№12	№13	№10
	Используемая стеклоткань Т-13								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, ГОСТ 11262	475	534	523	503	541	405	402	412	837
2. Модуль упругости при растяжении, ГПа, ГОСТ 9550	22,8	24,6	24,9	22,8	23,8	20,9	20,0	20,5	35
3. Деформация при растяжении, %	5,1	4,8	5,2	5,2	3,6	3,07	3,25	3,14	4,0
4. Изгибающее напряжение при разрушении, МПа, ГОСТ 4648	208	264	253	219	447	171	264	428	826
5. Модуль упругости при изгибе, ГПа, ГОСТ 9550	20,0	22,0	20,9	20,9	18,4	20,9	16,0	17,6	36,3
6. Разрушающее напряжение при сжатии, МПа, ГОСТ 4651	125	130	108	102	216	81,4	125	162	263
7. Плотность, г/см ³ , ГОСТ 15139	1,80	1,90	1,77	1,80	1,86	1,90	1,70	1,80	1,95
8. Содержание связующего, %, ОСТ 92-0903	29,1	28,4	30,4	26,9	26,1	24,3	34,7	31,0	26,0

Окончание табл. 1.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9. Степень отверждения, %, ОСТ 92-0903	95,6	94,3	92,8	92,7	95,8	94,3	94,6	97,0	96,0

Анализ данных таблиц 1.8 и 1.9 показывает, что отличительными особенностями предлагаемых эпоксидных связующих на основе капролактама-цинкового комплекса И-120У являются следующие признаки:

- увеличение времени жизнеспособности связующих в 2÷3 раза;
- заметное увеличение теплостойкости связующего по сравнению с прототипом;

- применение линейного инициатора И-120У в полимерных матрицах эпоксидных связующих позволяет существенно снизить температуру и время отверждения, не снижая теплофизических и прочностных характеристик, при этом создается более упорядоченная и менее дефектная структура сетчатого полимера и армированного пластика в целом;

- проведенные исследования показали повышение химической стойкости в агрессивных горюче-смазочных, кислотных и водных средах, а также уменьшение пористости армированных пластиков;

- предложенная технология изготовления армированных пластиков на основе органоволокон, базальтоволокон, углеволокон, стекловолокон осуществляется без применения растворителей, однако позволяет использовать различные мелкодисперсные добавки (тальк, слюда, гидроокись алюминия, графит, антипиренты, пигменты и т.д.);

- применение латентного инициатора И-120У позволяет уменьшить энергозатраты на стадии отверждения армированных наполнителями пластиков, улучшить санитарно-гигиенические условия труда и экологическую обстановку при производстве.

Предложенный способ управления жизнеспособностью связующих, очевидно, не единственен. Однако здесь важно акцентировать внимание на тех свойствах, которые в первую очередь обеспечивают требования производственных условий изготовления изделий из армированных пластиков.

1.15. Зависимость силы внутреннего трения от технологических параметров при изготовлении изделий из композиционных материалов

Не менее важным фактором, влияющим на качество изготовления оболочек при их трансформации в состоянии препрега, является величина силы внутреннего трения. Здесь под силой внутреннего трения понимается то сопротивление, которое испытывает нить при вытягивании ее из препрега. Чем меньше эта сила, тем более подвижным становится композиционный материал в состоянии препрега. Это создает дополнительные возможности для увеличения диапазона изменения конструкционных размеров изделий при их трансформации.

Поскольку силы внутреннего трения играют очень большую роль для решения проблемы получения высококачественных армированных систем, то здесь будут рассмотрены все параметры, влияющие на их величину.

Как установлено, на величину силы трения влияют: армирующий материал препрега, состояние его поверхности, схема армирования, связующее, его вязкость, температура переработки, скорость деформирования: Крагельский и др. [137].

С целью проверки влияния вязкости связующего на силу трения были проведены экспериментальные исследования. Испытания проводились на образцах ткани Т-13 размером $200 \times 40 \text{ мм}^2$. Одна из нитей перерезана на расстоянии 100 мм от края. Образцы предварительно были пропитаны связующим холодного отверждения Degakane 411-45 при определенной вязкости. Вязкость μ определялась на вискозиметре В246, $\varnothing 4 \text{ мм}$. Регулирование вязкости осуществлялось путем добавления растворителя (ацетон). Перерезанная нить выдергивалась из образца на разрывной машине РН-3-1 при скорости выдергивания нити 300 мм/мин. Температура в помещении, где проводились испытания, составляла $22 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом измерялась максимальная сила выдергивания. Вязкость μ измерялась в градусах Энглера

$$\mu = \frac{t_{жс}}{t_{г}},$$

где $t_{жс}$ – время истечения связующего объемом $V=100 \text{ см}^3$; $t_г = 10,56$ секунд – время истечения дистиллированной воды (указано заводом-изготовителем). Результаты испытаний представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10

Значения силы трения F

№ п/п	1	2	3	4	5	F_{cp} , Н	μ , °Е
$F, Н$	3,4	3,8	3,6	3,5	3,8	3,620	9,0
	3,8	3,4	3,5	3,4	3,6	3,540	7,9
	3,6	3,6	3,3	3,7	3,8	3,600	5,9
	3,4	3,4	3,4	3,6	3,3	3,420	4,8
	3,8	3,6	3,7	3,4	3,5	3,600	4,4
	3,2	4,0	3,6	3,5	3,3	3,520	1,2

Проанализировав данные таблицы 1.10 и обратив внимание на то, что средние значения силы трения практически одинаковы, можно поставить гипотезу о независимости силы трения от вязкости связующего, по крайней мере, в диапазоне изменения вязкости (1,2–9,0) °Е. Для доказательства этой гипотезы сравним любые две средние из 5 нормальных совокупностей – результатов измерений сил трения в пяти проведенных испытаниях при одном и том же значении вязкости связующего. Результаты пяти испытаний при одном и том же значении вязкости назовем выборкой. Если дополнительно предположить, что неизвестные генеральные дисперсии равны между собой, то можно построить критерий (Стьюдента) сравнения средних. Чтобы убедиться в этом, воспользуемся критерием Фишера-Снедекора и проверим гипотезу о равенстве генеральных дисперсий. Для этого найдем исправленные выборочные дисперсии S_1^2 и S_2^2 сравниваемых выборок по формуле

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (F_k^i - F_{cp}^i)^2, \quad (1.2)$$

где $i = 1, 2$ – номер выборки; n – объем выборки.

Результаты расчетов по формуле (1.2) представлены в таблице 1.11.

Таблица 1.11

Исправленные выборочные дисперсии						
i	1	2	3	4	5	6
S_i^2	0,032	0,028	0,035	0,050	0,025	0,097
$(F_{cp})_i$	3,62	3,54	3,60	3,42	3,60	3,52

В качестве критерия проверки нулевой гипотезы о равенстве генеральных дисперсий примем отношение большей исправленной дисперсии к меньшей, т.е. случайную величину [138]

$$Q = \frac{(S_i^2)_{\max}}{(S_i^2)_{\min}},$$

которая должна быть меньше критической точки $Q_{кр}(\alpha, k_1, k_2)$ распределения Фишера-Снедекора. Здесь α – уровень значимости (примем его равным 0,05); $k_1 = m - 1 = 4$; $k_2 = n - 1 = 4$ – степени свободы; $m = n = 5$ – объемы выборки. По таблице критических точек находим, что

$$Q_{кр}(0,05; 4; 4) = 6,39.$$

Так как $Q = 3,88 < Q_{кр}$, то нет оснований отвергать нулевую гипотезу о равенстве генеральных дисперсий. Поскольку предположение о равенстве генеральных дисперсий выполняется, сравним средние. В качестве критерия нулевой гипотезы примем случайную величину: Гмурман [138]

$$T = \frac{(F_{cp})_i - (F_{cp})_j}{\sqrt{(m-1)S_i^2 + (n-1)S_j^2}} \sqrt{\frac{mn(m+n-2)}{m+n}}. \quad (1.3)$$

Здесь i и j – номера выборок. Величина T при справедливости нулевой гипотезы имеет t – распределение Стьюдента с $k = m + n - 2$ степенями свободы. В таком случае по таблице критических точек распределения Стьюдента, по данному значению уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числу степеней свободы $k = m + n - 2 = 8$ находим критическую точку

$$t_{\text{двуст.кр}}(\alpha, k) = 2,31.$$

Если $|T| < t_{\text{двуст.кр}}(\alpha, k)$, то отвергать нулевую гипотезу нет оснований. Расчет значения T для $i, j = 1, 2, \dots, 6$ приведен в таблице 1.12.

Таблица 1.12

Значения T для $i, j = 1, 2, \dots, 6$

i, j	1	2	3	4	5	6
1	0	0,730	0,173	1,562	0,187	0,623
2	-0,730	0	-0,535	0,961	-0,583	0,126
3	-0,173	0,535	0	1,381	0	0,492
4	-1,562	-0,961	-1,381	0	-1,470	-0,583
5	-0,870	0,583	0	1,470	0	0,512
6	-0,623	-0,126	-0,492	0,583	-0,512	0

Так как на основании данных таблицы 1.12 $|T| < t_{\text{двуст.кр}}$ для всех $i, j = 1, 2, \dots, 6$, то можно говорить о равенстве средних. Это означает, что сила трения не зависит от вязкости связующего, если его величина изменяется в пределах $(1,2-9,0)^\circ\text{E}$. Эти пределы соответствуют требованиям технологических параметров при изготовлении изделий с использованием связующих холодного отверждения.

Для исследования препрегов с использованием связующих горячего отверждения было выбрано связующее ЭД-20 с добавлением к нему отвердителя изометилтетрагидрофталиевого ангидрида. Проводились испытания на пропитанных связующим об-

разцах ткани Т-13 по определению силы трения. Испытывались три вида связующего:

- 1) связующее ЭД-20 без отвердителя;
- 2) на 100 массовых долей ЭД-20 добавлено 70 долей отвердителя;
- 3) на 100 массовых долей ЭД-20 добавлено 82 доли отвердителя.

Такие составы комплексного связующего отработаны и рекомендованы технологами для изготовления изделий методами намотки. Скорость вытягивания нити составляла 300 мм/мин. Температура воздуха в помещении была равна 24 °С. Результаты испытаний представлены в таблице 1.13.

Таблица 1.13

Значения силы трения F

№ п/п		1	2	3	4	5	F_{cp}, H	$\mu, °E$	Отвердитель, доля
		F, H	1	3,2	3,3	3,4	3,6	3,6	3,42
	2	3,2	3,4	3,8	3,5	3,4	3,46	3,6	70
	3	3,3	3,4	3,4	3,4	3,3	3,36	3,2	82

В таблице 1.14 приведены результаты расчетов исправленной выборочной дисперсии, рассчитанной по формуле (1.2) на основании данных таблицы 1.13.

Таблица 1.14

Исправленные выборочные дисперсии

i	1	2	3
S_i^2	0,032	0,048	0,030
$(F_{cp})_i$	3,42	3,46	3,36

Случайная величина Q равна

$$Q = \frac{(S_i^2)_{\max}}{(S_i^2)_{\min}} = 1,6.$$

Она меньше критической точки, равной

$$Q_{кр} (0,05; 4; 4) = 6,39.$$

Следовательно, исправленные выборочные дисперсии различаются незначительно.

Для сравнения средних величин силы трения вычислим значение T для $i, j = 1, 2, 3$ по формуле (1.3). Результаты расчетов представлены в таблице 1.15.

Таблица 1.15

Значения T для $i, j = 1, 2, 3$

i, j	1	2	3
1	0	-0,316	0,539
2	0,316	0	0,801
3	-0,539	-0,801	0

Так как $|T| < t_{двуст.кр} (0,05; 8) = 2,31$ для всех $i, j = 1, 2, 3$, то отсюда следует справедливость гипотезы о равенстве средних. На этом основании можно считать, что для связующего горячего отверждения сила трения не зависит от его вязкости, если вязкость находится в пределах (3,2–64,2) °Е.

Для установления зависимости силы трения от температуры препрега образец ткани Т-13, закрепленный на разрывной машине РМ-30-1, накрывался специальным колпаком для обеспечения заданного температурного режима. Нагрев осуществлялся обогревателем инфракрасного излучения. Измерение температуры осуществлялось пирометром Р-55 – прибором для бесконтактного измерения температуры тел на расстоянии от 1 до 30 метров. Скорость вытягивания нити составляла 300 мм/мин. Проведенные испытания по определению силы трения на образцах из ткани Т-13, пропитанных связующим (100 частей ЭД-20 + 70 частей отвердителя), дали следующие результаты, представленные в таблице 1.16.

Таблица 1.16

Значения силы трения F

№ п/п	1	2	3	4	5	F_{cp}, H	$T, ^\circ C$
F, H	3,3	3,4	3,4	3,4	3,3	3,36	24
	3,2	3,2	3,3	3,5	2,9	3,22	30
	3,4	3,5	3,3	3,4	3,6	3,44	50
	3,6	3,5	3,2	3,1	3,4	3,36	70
	3,8	3,2	3,5	3,5	3,4	3,48	90

Проанализировав таблицу 1.16, формулируем гипотезу о независимости силы трения от температуры в пределах изменения (24–90) °С. Для доказательства такого предположения, как и в предыдущих случаях, вычислим вначале исправленные дисперсии всех выборок, представляющих собой результаты определения силы трения при постоянной температуре. Результаты таких вычислений представлены в таблице 1.17.

Таблица 1.17

Исправленные выборочные дисперсии

i	1	2	3	4	5
S_i^2	0,030	0,047	0,013	0,043	0,047
$(F_{cp})_i$	3,36	3,22	3,44	3,36	3,48

Вычислим отношение большей исправленной дисперсии к меньшей

$$Q = \frac{0,047}{0,013} = 3,615.$$

Критическая точка равна

$$Q_{кр} (0,05; 4; 4) = 6,39.$$

Так как $Q < Q_{кр}$ – нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу о равенстве генеральных дисперсий. На этом основании сравним средние. Для этого вычислим наблюдаемое значение критерия Стьюдента T для $i, j = 1, 2, \dots, 5$. Результаты вычислений по формуле (1.3) представлены в таблице 1.18.

Таблица 1.18

Значения T для $i, j = 1, 2, \dots, 5$

i, j	1	2	3	4	5
1	0	1,128	-0,863	0	-0,967
2	-1,128	0	-2,008	-1,043	-1,896
3	0,863	2,008	0	0,756	-0,365
4	0	1,043	-0,756	0	-0,894
5	0,967	1,896	0,365	0,894	0

Для всех $i, j = 1, 2, \dots, 5$ значения T из таблицы 1.18 удовлетворяют неравенству

$$|T| < t_{\text{двуст.кр}}(0, 05; 8) = 2,31.$$

Это даст основание сделать вывод о независимости силы внутреннего трения для препрегов от температуры переработки, если температура T находится в диапазоне (24–90) °С.

Остановимся теперь на установлении зависимости силы внутреннего трения у препрегов от скорости деформации. Для этого при нормальных условиях были проведены испытания на разрывной машине РМ-30-1 при различных скоростях выдергивания нити из образца ткани Т-13. При этом образцы ткани не были пропитаны связующим. Результаты испытаний представлены в таблице 1.19.

Таблица 1.19

Значения силы трения F

№ п/п	1	2	3	4	5	F_{cp}, H	Скорость вытягивания, мм/мин
F, H	1,5	1,6	1,6	1,4	1,5	1,52	100
	2,3	2,3	2,0	2,0	2,3	2,18	200
	2,8	2,8	2,8	2,5	2,8	2,74	300
	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,70	400
	2,8	1,8	2,15	2,6	2,6	2,7	500
	2,4	2,5	2,6	2,6	2,4	2,5	600
	2,6	2,7	2,6	2,4	2,4	2,54	700

По полученным средним значениям сил трения F_{cp} построен график зависимости силы трения от скорости вытягивания нити.

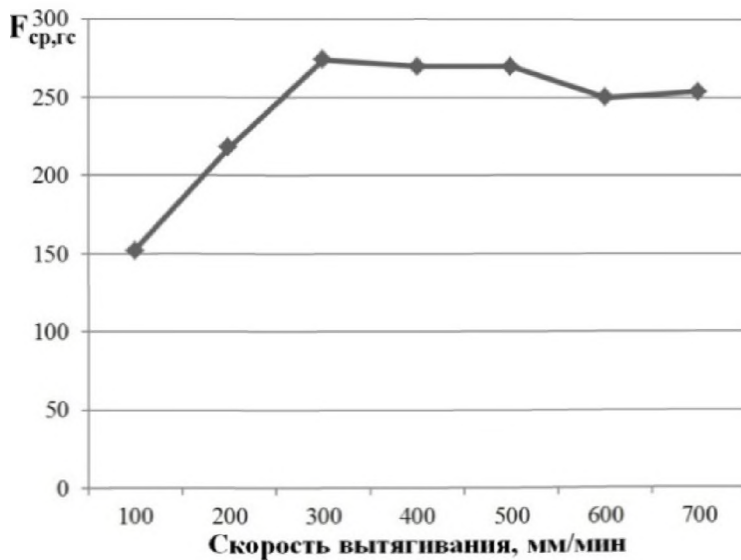


Рис.1.8. График зависимости силы трения от скорости вытягивания нити

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы.

1. Сила трения зависит от скорости вытягивания нитей из препрега, причем, чем меньше скорость вытягивания, тем меньше силы трения. Отсюда следует рекомендация. Изгиб цилиндрической оболочки для превращения ее в торовую необходимо производить при скорости движения по возможности наименьшей. При этом необходимо запланировать несколько кратковременных остановок, позволяющих материалу препрега полностью осуществлять «запоздалые деформации». Такая ползучесть материала происходит из-за его микроструктурной неоднородности.
2. При скорости деформации более 300 мм/мин сила трения практически постоянна.
3. При скорости деформации менее 300 мм/мин сила трения становится меньше.

1.16. Технологии формования силового набора

Композиты можно охарактеризовать как определенную комбинацию разнородных материалов, обладающую специфической структурой и геометрической формой, а текстильные композиты определяются в виде комбинации полимерного связующего с системой волокон или нитей либо с тканью.

Ориентация волокнистого наполнителя и его содержание в полимерной матрице позволяет, с одной стороны, оценить физико-механические свойства материала, а с другой стороны, управлять технологическими параметрами процесса формования изделий, а, следовательно, определять и требования к применяемому оборудованию: Асланова и др. [139–143]. Другим преимуществом перед обычными изотропными материалами является эффективное управление анизотропией их механических, теплофизических и других свойств в плоскости армирования. Это дает дополнительные резервы в повышении надежности конструкций, снижении их массы и расширении области применения. Управление анизотропией свойств осуществляется варьированием укладки арматуры.

Элементы конструкции из текстильных композитов, воспринимающие основные и вспомогательные нагрузки, должны изготавливаться из высокомодульных волокон или нитей. К числу основных высокомодульных волокон относятся стеклянные, углеродные,

органические, керамические и стальные волокна. Каждый из этих видов волокон обладает своими характерными преимуществами и недостатками по сравнению с другими. Например, углеродные волокна самые жесткие и самые хрупкие. Стекланные волокна самые дешевые, обладают высокой вязкостью разрушения. Поэтому в течение последних 50 лет стекланные волокна являлись и являются основными общепринятыми конструкционными материалами для множества разнородных изделий из текстильных композитов: Альперин и др. [144–149].

Разнообразие типов волокнистых наполнителей и связующих, достаточно большой набор методов и приемов формования изделий позволяют обеспечить наиболее рациональный подход к выбору технологий и аппаратного оформления процессов производства: Альшильц, Цыплаков и др.[147, 149–152]. Обзор современных технологий [153–167] изготовления элементов конструкций из композиционных материалов позволяет выделить следующие основные направления для анализа:

- методы контактного формования;
- технологии пултрузии;
- методы намотки на оправку.

Контактное формование является традиционным способом изготовления композитных конструкций любых форм, размеров и сложности при сравнительно невысоких капитальных затратах. Контактное формование осуществляется на матрице вручную или методом напыления и является процессом холодного отверждения. Технология ручной укладки включает следующие основные операции:

- нанесение разделительных покрытий на формы;
- раскрой тканых или нетканых армирующих материалов;
- приготовление связующего;
- укладка армирующего материала на форму;
- нанесение на армирующий материал связующего и пропитка им арматуры;
- отверждение связующего;
- извлечение изделия из формы.

К недостаткам метода контактного формования относятся большие затраты ручного труда, низкая производительность, зависимость качества изделий от квалификации формовщика, труд-

ность обеспечения однородности материала и стабильности его физико-механических свойств, большие разбросы геометрических характеристик.

Использование вакуумного формования и вакуумной пропитки может до определенного предела улучшить характеристики материалов за счет стабилизации содержания смолы. Для изготовления может быть также применен метод инъекции смолы в закрытую форму (RTM-метод). Суть метода [154, 155] заключается в том, что между двумя матрицами укладывается сухой, предварительно раскроенный армирующий материал и под давлением впрыскивается смола.

Данный метод позволяет:

- обеспечить точные размеры и воспроизводство изделий;
- повысить содержание армирующего наполнителя в композиции и тем самым значительно повысить физико-механические характеристики по сравнению с ручным формованием;
- сократить время изготовления и повысить оборачиваемость оснастки;
- резко снизить выделение вредных веществ в атмосферу.

Имеются модификации данного метода (LightRTM), когда в рабочей полости форм создается разрежение. К недостаткам метода RTM следует отнести большие затраты на оснастку и оборудование.

Технология пултрузии (протяжки) – метод получения непрерывного профиля путем протяжки пропитанных связующим армирующих стекломатериалов через нагретую формообразующую фильеру. Первый патент на пултрузию получил в США Брант Голдсворти в 1951 г. [157]. Пултрузия позволяет использовать «мокрую» и «сухую» технологии. При использовании в качестве исходного материала однонаправленных ровингов физико-механические характеристики профиля имеют сильную анизотропию свойств, что может быть в ряде случаев неприемлемым. Поэтому в методе пултрузии могут быть использованы также нетканая нитепрошивная лента с заранее выбранной схемой расположения армирующих элементов, маты, тканые ровинги и их комбинации, что позволяет создать оптимальную схему армирования [158, 159]. За счет строго контроля натяжения и ориентации волокон, уменьшения количества пор и стабилизации содер-

жания армирующих волокон в композите характеристики межслойного сдвига в данном методе на 30–35 % выше, чем у способа вакуумного формования. Пултрузия допускает полную автоматизацию технологического процесса и обеспечивает его высокую производительность. Основной недостаток данного метода – дороговизна и уникальность оборудования для изготовления. Кроме того практически все оборудование выпускается для производства прямых профилей.

В последнее время появилась информация [160] о разработке фирмой ThomasGbmH+Co технологии радиусной пултрузии (Radius – Pultrusion), позволяющей изготавливать плоские и пространственно-изогнутые профили (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Образцы изогнутых плоских профилей, полученных методом пултрузии:
a – плоских; *б* – пространственных

Основной принцип радиусной пултрузии заключается в том, что изогнутая форма движется вдоль криволинейного профиля, а не наоборот, как в стандартной технологии. Так как это нельзя делать продолжительное время, процесс пултрузии разделен на несколько этапов (рис. 1.10).

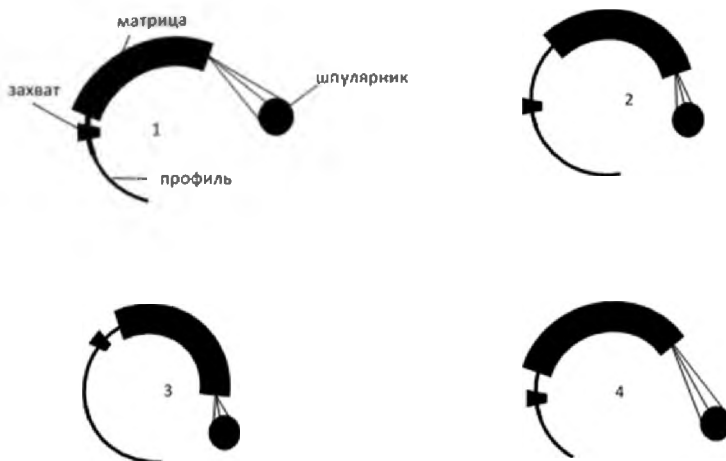


Рис. 1.10. Этапы радиусной пултузии

1. Загрузка материала в форму. Форма и захват движутся вдоль создающегося профиля.

2. Захват неподвижен. Форма движется вдоль отверждающейся части профиля. Твердая часть профиля покидает форму.

3. Захват открыт и продвигается к торцу формы вдоль кривой. Продолжается отверждение.

4. Процесс повторяется с этапа 1.

Существующее оборудование позволяет обеспечить радиус профиля 300–1000 мм и размеры 100 × 200 мм. Дополнительное ограничение процесса связано с максимальной длиной формы, которая для плоских кривых ограничена угловым размером $\alpha \leq 45\text{--}90^\circ$, что влияет на скорость процесса изготовления профилей, особенно для малых радиусов.

Профиль с углом охвата 360° может быть изготовлен, если жесткость его на кручение не слишком велика, при этом профиль не будет замкнутым, поэтому изготовление кольцевых шпангоутов методом радиусной пултузии требует дополнительного соединения. Сегодня профили и подкрепленные панели, изготавливаемые методом пултузии, широко используются в строитель-

стве, судостроении, авиационной технике и могут по показателям на равных конкурировать с методом намотки.

Наиболее распространенным методом изготовления конструкций ракетно-космической техники является метод намотки. В зависимости от применяемого оборудования и структуры армирования на сегодняшний день известны следующие технологии намотки [153–156, 161–167]:

- спирально-кольцевая;
- орбитальная (плоскостная);
- продольно-поперечная;
- совмещенная;
- зонная;
- косослойная продольно-поперечная (КППН).

За счет непрерывности намотки, управления параметрами натяжения и содержания связующего можно достичь высокой прочности и жесткости материала конструкции. На сегодняшний день достигнуты характеристики прочности армирующих волокон в микропластике ~ 600 кг/мм², модуля упругости ~ 16000 кг/мм² (Русар-С).

Метод намотки и программное обеспечение для станков с ЧПУ наиболее разработаны для изготовления оболочек вращения типа цилиндр, конус, сфера, оваллоид и их комбинаций. Для траекторий намотки используются геодезические линии и траектории с отклонением от геодезических линий в пределах конуса трения.

Достижение требуемой ориентации волокнистого наполнителя в стенке изделия – довольно трудная задача. И наибольшие возможности здесь разработчикам предоставляет метод намотки. Выбор оптимальных углов намотки в сочетании с требуемым технологическим натяжением позволяет придать материалу изделий анизотропию свойств, наиболее полно отвечающую характеру внешних нагрузок. Таким образом, метод намотки дает возможность в максимальной степени использовать достоинства армированных пластиков как конструкционного материала.

К числу недостатков метода намотки следует отнести прежде всего низкую герметичность изделий, характерную, впрочем, и для других методов открытого формования. Герметизация намотанных изделий обеспечивается посредством создания много-

слойных конструкций со слоями эластомеров, термопластов, а также металлов [23–28].

Возможность изготовления методом намотки изделий сложной геометрической формы в значительной степени ограничена, стоимость оборудования достаточно высока [29]. Тем не менее достоинства метода намотки столь существенны, что он широко применяется в самых различных отраслях промышленности.

В качестве элементов подкрепления тонкостенных оболочек, выполненных методом намотки, наиболее широкое применение нашли шпангоуты сплошного поперечного сечения, изготавливаемые послойной тканой или нитяной намоткой. Масса таких шпангоутов является весьма значительной, до 30 % массы подкрепленной оболочки, а конструкция нерациональной. Поэтому весьма актуальна задача замены сплошных шпангоутов на более эффективные в весовом отношении профильные (тавровые, коробчатые и др.).

Проведенный литературный и патентный поиск позволил установить направления технологических решений по изготовлению конструкций рационального подкрепления оболочек. В работе [168] опорный шпангоут (рисунок 1.11, *а*) содержит профильную оправку-каркас и оплетку из спиральных и кольцевых нитей. Оплетка деформируется внешним давлением и приобретает форму каркаса.

Изготовление данного шпангоута многостадийное:

- намотка, сборка и полимеризация оправки-каркаса;
- намотка, деформирование и полимеризация оплетки.

Для изготовления оплетки требуется торонамоточный станок.

Авторами [169] предложена конструкция и технология изготовления торового опорного шпангоута. Шпангоут образован чередующимися слоями спиральной и кольцевой намотки на оправке-каркасе соединенных между собой торцами полок или наружными поверхностями стенок (рисунок 1.11, *б*). Формообразование конструкции опорного шпангоута начинается с намотки каркаса на прямоугольной оправке на торонамоточном оборудовании, рисунок 1.11, *в*. На кольцевую вращающуюся оправку (1), приводимую в движение от электродвигателя (2), производят укладку спиральной (3) или кольцевой (4) армировки, сматываемой с бобины (5) или шпулярника (6). Укладка спиральной арматуры производится двойной перекрестной намоткой посредством намоточной головки (7),

приводимой в движении электродвигателем (8) и передачей (9). Изготовленная таким образом заготовка 10 поступает на термообработку. Затем заготовка разрезается на 2 Г-образных кольцевых швеллера (13), которые совмещают и склеивают по боковым (14) или торцевым (15) поверхностям, образуя оправку-каркас.

На полученную оправку проводят намотку основной силовой части коробчатого шпангоута и проводят окончательную термообработку. В работе [170] показаны варианты изготовления подкрепляющих элементов из намоточного коробчатого профиля путем его разрезки и последующего склеивания элементов (рис. 1.12). Улучшение физико-механических характеристик таких шпангоутов можно осуществлять за счет варьирования схемой армирования, применения гибридных материалов дополнительного трансверсального армирования [1711–73].

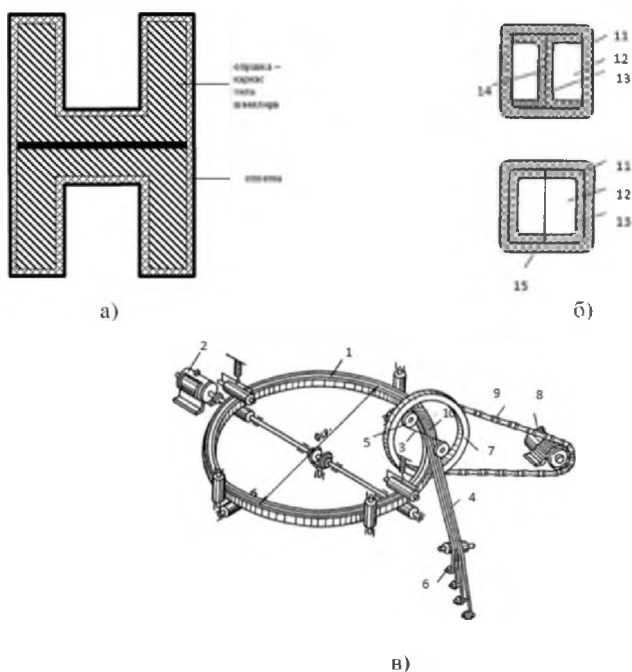


Рис. 1.11. Варианты изготовления шпангоутов (а, б).
Схема торонамоточного станка (в)

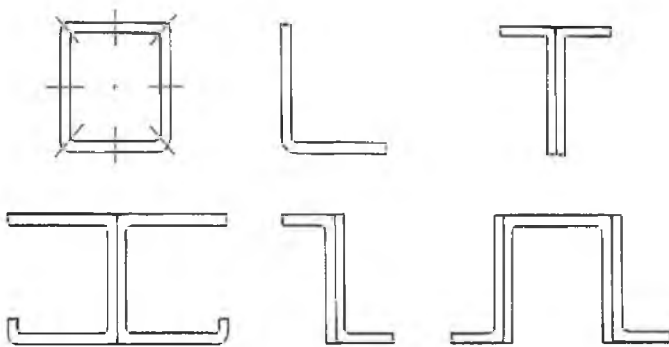


Рис. 1.12. Варианты изготовления шпангоутов последующей разрезкой коробчатой конструкции и склеиванием ее элементов

При отдельном изготовлении шпангоута и оболочки возникает задача их соединения. Наиболее распространенным является клеевое соединение, к положительным качествам которого относится [162, 167, 170, 171]:

- отсутствие характерных для механических соединений отверстий уменьшающих рабочее сечение соединяемых элементов;
- возможность получения гладкой внешней поверхности изделий и герметичных соединений;
- возможность создания относительно равномерного поля распределения напряжений за счет изменения жесткости клеевой прослойки или соединяемых элементов, особенно на его начальных участках. Недостатками клеевых соединений является низкая эффективность их применения для передачи больших сосредоточенных нагрузок, низкая прочность клея при сдвиге, резкое снижение прочностных характеристик при действии повышенных температур и агрессивных сред.

Проведенный обзор технических решений и технологий подкрепления кольцевыми ребрами жесткости композитных оболочек показал, что их развитие в части массового совершенства идет по пути создания профильных и полых шпангоутов, при этом применение типовых технологий намотки сдерживается рядом факторов:

- известные конструктивно-схемные и технологические решения предполагают, как правило, отдельное изготовление обечайки и

шпангоутов и их последующее клеевое соединение, что не обеспечивает необходимой точности их формы и геометрических

– размеров, а также сдвиговой прочности соединения;

известные технологические решения не позволяют создавать эффективные шпангоуты различных профилей;

– известные решения, как правило, не ориентированы на изготовление подкрепленных оболочек в рамках совмещенного технологического процесса (интегральные конструкции).

Преодолеть указанные недостатки во многом возможно, если ориентироваться на методы трансформации при изготовлении конструкций способом намотки. Суть способа изготовления шпангоута заключается в следующем [172, 173]. Нетканая лента, либо плоская лента диагонального плетения или лента типа «сплюснутый оплеточный рукав» наматывается на оправку с кольцевой канавкой или кольцевым выступом по форме наружного профиля меридианального сечения шпангоута. На рис. 1.13 в качестве примера приведена схема намотки деформируемой псевдолентой внутреннего шпангоута \surd -образного профиля.

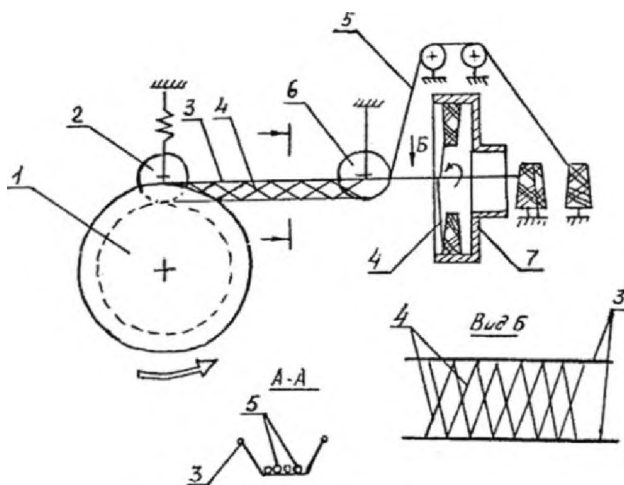


Рис. 1.13. Схема намотки деформированной лентой

Лента с нитями спирального армирования (4), сматываемые со шпуль, установленных на вертлюге (7), снабжена двумя фиксируемыми на оправке (1) поперечными (кромочными) нитями (3), воспринимающими усилия технологического натяжения при намотке, задающими ширину ленты и предотвращающими ее вытягивание и жгутование. В углах между стенками и нижней горизонтальной полкой шпангоута в процессе намотки на ленту накладываются промежуточные поперечные нити (5), сматываемые с отдельно установленных шпуль и фиксирующие заданную геометрию профиля прижатием ленты к оправке. Деформирование ленты по профилю сечения шпангоута осуществляется формообразующим (6) и прижимным (2) роликами. Проходя через ролики, лента приобретает корытообразную форму и оказывается растянутой поперечными нитями.

Уменьшая ширину ленту и перемещая прикатывающий ролик, можно формировать дополнительные промежуточные полки (рис. 1.14), повышающие устойчивость стенок и жесткость шпангоута в целом [174]. Данная технология позволяет изготавливать шпангоуты отдельно и совместно с оболочкой в едином технологическом процессе (интегральные конструкции). Намотка нетканой лентой осуществляется всухую, поэтому пропитка ее производится на оправке контактным способом с помощью тампона за несколько операций в течение технологического цикла.

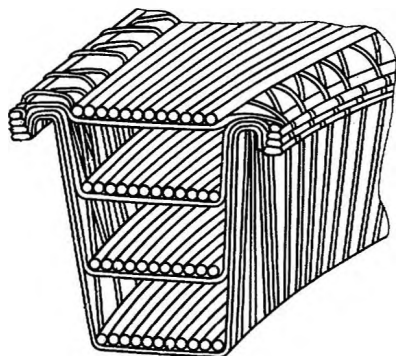


Рис. 1.14. Структура материала шпангоута с промежуточными полками

Форма шпангоутов может быть разнообразной (рис. 1.15). Данное многообразие можно еще более расширить, если ввести дополнительный этап трансформации полученной \surd -образной заготовки. Модификация профиля сечения может быть осуществлена сдвижкой элементов оправки вдоль ее оси с намотанным, но неотвержденным полуфабрикатом (рис. 1.16). На рис. 1.17 показаны фотографии фрагментов модельных шпангоутов, форма поперечного сечения которых образована сдвижкой оснастки, ленты, выкроенной из ортогональной ткани под углом 45° . На рис. 1.18, 1.19 представлены интегральная оболочка с тавровыми шпангоутами и оправка для ее намотки нетканой лентой.



Рис. 1.15. Фрагменты шпангоутов различного поперечного сечения из нетканой ленты

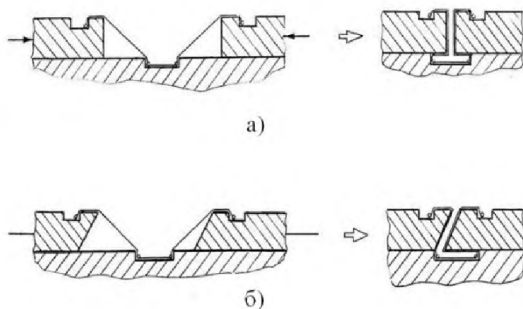


Рис. 1.16. Модификация профилей сечений шпангоутов сдвижкой элементов оснастки: *a* – формирование сечения таврового профиля; *б* – формирование сечения Z-образного профиля



Рис. 1.17. Фрагменты шпангоутов из тканой ленты, армированной под углом $\pm 45^\circ$



Рис. 1.18. Модель интегральной цилиндрической оболочки с тавровыми шпангоутами

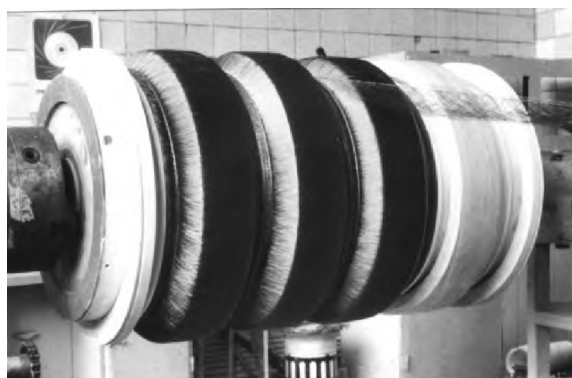


Рис. 1.19. Намотка оболочки при раздвинутых элементах оправки

В работе [175] предложена конструкция опорного шпангоута-отсека (рис. 1.20), образованного комбинацией чередующихся концентрических слоев сплюснутых кольцевых рукавов корытообразного профиля и нитей кольцевого армирования в Г-образных выступах 2 на его торцах. Слои разнесены по высоте сечения с образованием замкнутых кольцевых полостей 1. Слои сплюснутых корытообразных рукавов в средней части шпангоута скреплены между собой по кольцевым поясам 3 с образованием полых кольцевых элементов 4. Изготавливают шпангоут следующим образом. На разборной оправке, имеющей на своей рабочей поверхности профильные кольцевые канавки, по своей конфигурации соответствующие профилям отсеков шпангоута, производят намотку сплюснутого рукава с одновременным утягиванием его срединной части во все кольцевые канавки нитями кольцевого армирования. Намотка производится так, что кромки сплюснутых рукавов каждого слоя фиксируются в кольцевых проточках оправки, образуя на торцах шпангоута-отсека кольцевые Г-образные выступы 2. Наматывая таким образом необходимое количество слоев, получают внутреннюю оболочку шпангоута. После сужения ширины сплюснутого рукава до размера, равного периметру поперечного сечения наружной оболочки, производят его намотку. При этом в местах кольцевых канавок образуются дополнительные подкрепляющие полые кольцевые элементы 4, а части срединных участков сплюснутых рукавов, расположенные между кольцевыми канавками, скрепляются между собой, образуя кольцевые пояса 3. Далее производят термообработку и извлечение оправки из готового изделия.

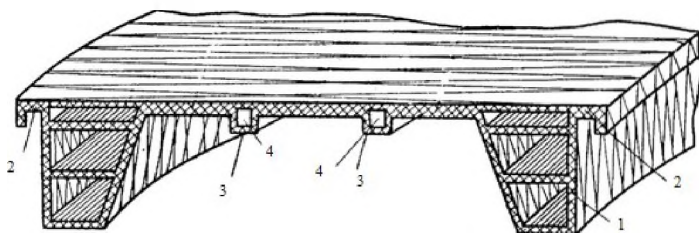


Рис. 1.20. Опорный шпангоут-отсек

В работе [176] предложена конструкция опорного шпангоута с наружным ребром, варианты исполнения которого представлены на рис. 1.21. Данный шпангоут также образован чередующимися слоями сплюснутых кольцевых рукавов. Наружное кольцевое ребро образовано слоями ветвей сплюснутых рукавов, охватывающих шпангоут по наружному и внутреннему контурам. Ветви ребра в месте перехода к торовому шпангоуту образуют совместно с его торцом дополнительный кольцевой коробчатый профиль. Данное исполнение шпангоута может обеспечить стык двух цилиндрических оболочек разного диаметра.

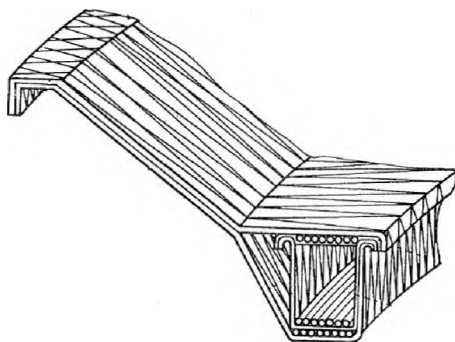


Рис. 1.21. Опорный шпангоут с наружным ребром

Подводя итог обзору формования силового набора, можно отметить, что наиболее прогрессивной является технология, основанная на намотке и трансформации диагонально армированных структур: нетканой псевдоленты, ленты или рукавов диагонального плетения.

1.17. Усадка и коробление

Усадка является одной из важнейших технологических и эксплуатационных характеристик материала [177–181]. Точность размеров и взаимозаменяемость деталей зависят от целого комплекса причин, в котором на долю усадки и ее колебаний приходится 75–80 %. Кроме того, усадка приводит к возникновению значительных внутренних напряжений, потере деталями геометрической

формы, короблению, трещинам, отслаиванию футеровки и т.д. Определение усадочных характеристик имеет важное значение при конструировании и изготовлении деталей, при конструировании формирующего инструмента, при оценке работоспособности и надежности конструкций, при выборе марки и оценке эксплуатационных качества пресс-материала. Как правило, под усадкой понимается уменьшение объема (объемная усадка) или размеров (линейная усадка) по сравнению с размерами оформляющих деталей пресс-формы, происходящее при изготовлении изделия, а также в результате его хранения и эксплуатации. Обычно измеряют линейную усадку изделия в направлении, перпендикулярном направлению движения пуансона, так как этот размер получается наиболее точным, легко контролируется и обычно является посадочным или сопрягаемым.

Важно различать действительную и расчетную линейную усадку. Под действительной линейной усадкой понимается разность между размером одного и того же элемента детали, определенным при температуре, соответствующей началу усадки, L_{01} (фактически это размер пресс-формы, нагретой до температуры прессования) и размером после полного охлаждения детали – L_{01} . Под расчетной линейной усадкой понимается разность между размером оформляющего элемента пресс-формы L_{p1} , измеренным при температуре 293 К, и размером соответствующего элемента детали L_{p2} , измеренным при той же температуре. Эта разность дает абсолютную величину расчетной усадки.

Выбор образцов имеет большое значение при определении влияния различных параметров на величину усадки. Это объясняется прежде всего тем, что конфигурация образца влияет на получаемый результат, правильная оценка которого возможна лишь при наличии определенных критериев, позволяющих производить сравнение. Поэтому величины относительных расчётных усадок, определённые для одного и того же материала, но на разных образцах или деталях, колеблются в довольно широких интервалах. Правильное и точное измерение усадки деталей очень важно, достоверность получаемых результатов зависит от многих факторов. Суммарная погрешность измерения включает в себя погрешность измерительных и повероч-

ных средств, а также погрешности из-за отклонения температуры, непостоянства измерительного усилия и деформации детали при ее извлечении из пресс-формы. ГОСТ 18616–73 предусматривает измерение усадки с помощью универсальных измерительных инструментов: штангенциркуля и микрометра. Результаты таких измерений следует рассматривать только как ориентировочные из-за неопределенности прикладываемого измерительного усилия и смещения точек измерения. Это приводит к тому, что заданный допуск размера становится одного порядка с величиной погрешности измерения.

При использовании специальных приборов и приспособлений с индикаторами часового типа точность измерения возрастает до 0,005 мм при фиксированном измерительном усилии $2 \cdot 10^3$ Н. Вследствие этого приспособления с индикаторами широко используются в лабораторной практике и в цеховых условиях.

Усадка представляет собой сложное явление и зависит от многих факторов: технологических параметров формования, способа подготовки материала, режима охлаждения изделия после извлечения из пресс-формы, конструкции изделия и структурных параметров композиции (длины и диаметра армирующих элементов, их объемного содержания c_0 , закона распределения в объеме).

Анализ влияния структурных параметров на усадку может быть осуществлен путем решения задачи об определении перемещений и напряжений вязко-упругой среды, содержащей коротковолокнистые упругие включения. Эта задача является чрезвычайно сложной для решения даже численными методами. Поэтому в настоящее время представляется наиболее целесообразным качественный анализ на основе упрощенной модели, позволяющей приблизительно выявить основные закономерности влияния структурных параметров на усадку рассматриваемых композиций. Такой анализ естественно начать с однонаправленной композиции, которую можно представить в виде элементарных моделей – звеньев, последовательно соединенных таким образом, что вероятность несовпадения торцов армирующих элементов в двух смежных звеньях будет равна объемному содержанию полимерной матрицы $1 - c_0$.

Влияние технологических параметров изготовления деталей на величину усадки определяется, во-первых, случайными отклонени-

ями от заданных режимов и, во-вторых, возможностью изменять технологические параметры в определенных пределах с целью обеспечения заданных размеров деталей. Этому вопросу посвящено значительное количество работ [177–181], в которых изучалось раздельное влияние основных технологических параметров – давления прессования P , температуры T и времени выдержки τ – на усадку композиционных материалов с порошкообразным наполнителем, но без учета совместного действия этих факторов.

В процессе формования изделий из хаотически армированных композиций происходит ориентация армирующих элементов. Под абсолютной величиной степени ориентации S будем понимать [182] отношение массы однонаправленной части композиции m_0 к массе всей композиции m_k с тем же объемным содержанием наполнителя и той же длиной армирующих элементов

$$S = m_0 / m_k = m_0 (m_0 + m_x)^{-1} = c_0' (c_0' + c_0'')^{-1} = c_0', \quad (1.4)$$

где m_x – масса хаотически армированной части композиции; c_0' и c_0'' – объемное содержание однонаправленного и хаотически армированного материала в композиции соответственно.

В общем случае степень ориентации \bar{S} является величиной векторной, так как характеризуется не только абсолютной величиной, но и направлением ориентации. Для полностью хаотически армированного материала абсолютная величина степени ориентации $S = 0$, для однонаправленной структуры $S = 1$. Реальную структуру материала можно моделировать двухслойной средой, в которой один слой полностью ориентирован, а другой является хаотически армированным. Частично ориентированная структура определяется соотношением слоев (их толщина) и задается параметром S [183].

Опыт переработки стекловолоконистых пресс-материалов показывает, что во многих случаях даже для сравнительно простых изделий наблюдается отклонение от заданной чертежом геометрической формы, связанное с короблением изделий. Коробление является одним из наиболее распространенных видов брака и

происходит, если имеются различия в величине усадки по объёму изделия. В этом случае свободная деформация отдельных частей изделия при его охлаждении оказывается затрудненной, что приводит к появлению внутренних напряжений и изгибающих моментов, вызывающих коробление.

Различия в усадке являются следствием неодинаковых условий протекания сложных физико-химических процессов во время формирования изделия (отверждение, возникновение и релаксация напряжений) и после его извлечения из пресс-формы (охлаждение, релаксация напряжений) и зависят от большого числа факторов, точный учет влияния которых в настоящее время произвести не представляется возможным. К таким факторам относятся разнотолщинность элементов изделия, различия в температуре нагрева матрицы и пуансона, нестационарность и неоднородность температурного поля пресс-формы, анизотропия усадки. Для хаотически армированных стеклопластиков различия в усадке определяются главным образом разной степенью ориентации армирующих волокон по зонам изделия, т.е. технологической анизотропией усадки.

Рассмотрим некоторые типичные случаи коробления хаотически армированных стеклопластиков. При изготовлении плоской детали типа пластины методом компрессионного формования отсутствует течение, а, следовательно, механические свойства изотропны. Однако по периметру изделия, у его кромок, наблюдается ориентация армирующих элементов вдоль кромок из-за ограничения возможных углов расположения армирующих элементов [182]. Вследствие этого усадка в зоне кромок меньше усадки средней части изделия, а возникающие напряжения сжатия по контуру изделия приводят к короблению в результате потери устойчивости.

В случае осесимметричного изделия в форме усеченного конуса с днищем в средней зоне стенок изделия армирующие элементы ориентируются в вертикальном направлении. Ближе к кромке изделия происходит дезориентация первоначального потока или его ориентация вдоль кромки. В результате усадка в окружном направлении у кромки изделия будет ниже, чем в средней зоне стенок, и кромки изделия будут испытывать сжимающие напряжения. Под действием указанных напряжений возможна локальная потеря

устойчивости, и первоначально круглое поперечное сечение вблизи кромки искажается.

Увеличению анизотропии прочности соответствует увеличение коэффициентов анизотропии усадки [183], при этом в направлении ориентации прочностные показатели возрастают, а усадка уменьшается, в перпендикулярном направлении – наоборот. Повышенная усадка днища заставляет изделие коробиться. При этом в кромке возникают сжимающие напряжения, а в нижних зонах – растягивающие напряжения, о чем свидетельствуют и результаты измерения тензометрическим методом деформаций образцов после вырезания их из изделия.

Неоднородность механических свойств и усадки может быть в значительной степени нивелирована дополнительным армированием отдельных частей детали стекловолокнистыми материалами стабильной структуры в виде тканей, сетки, жгутов и др. Это существенно уменьшает коробление. В общем случае при решении задачи о короблении хаотически армированных изделий необходимо учитывать неоднородность и нестационарность температурного поля, вязкоупругие свойства материала. В этом случае матрица податливостей заменяется матрицей временных операторов [184–186], а вместо компонент тензора усадок также появляются некоторые временные операторы, зависящие от вязкоупругих свойств полимерной матрицы.

На стадии проектирования изделий, выбора конструкции формирующего инструмента, способа переработки материала достаточно ограничиться решением упругой задачи. Даже в этом случае для подавляющего большинства реальных изделий решение задачи может быть получено только численными методами с использованием современных электронно-вычислительных машин. В частном случае для ортотропных пластин термоупругая задача решена в аналитическом виде [187]. В связи с отсутствием в настоящее время достаточного опыта по решению таких задач на практике пользуются рекомендациями, основанными на многолетних результатах конструирования, изготовления и эксплуатации изделий.

Отсутствие фундаментальных исследований напряженно-деформированного состояния препрегов не является предположением о том, что промышленностью не выдвигается таких требований. Более того, исследования в этом направлении стали настолько

насушными, что обойтись без них уже невозможно. Очевидно, начинать надо с плана исследований. Такой план может отразить математическая модель, которая концентрирует в себе записанную в форме математических предложений совокупность знаний о препрегах. Как известно [188], при построении математической модели системы необходимо учитывать следующие основные требования: адекватность, универсальность, точность и экономичность. С этой точки зрения математическая модель препрегов должна включать в себя [188]:

- геометрическую модель – препреги, которые представляют собой ортотропную многослойную структуру на основе гладких тканей, выполненных из многоволоконных нитей, имеющих упорядоченное расположение волокон и пропитанных связующим;

- механико-математическую модель – установление функциональных зависимостей между напряжениями и деформациями армирующего материала препрегов, зависимости для предельных сил трения вместе с гипотезами об абсолютной гибкости нитей и достаточной малости коэффициентов внутреннего трения;

- полную систему уравнений статики;

- граничные условия;

- модель решения.

Математическое моделирование процесса деформирования в препреге базируется на физических принципах, обуславливающих формирование сил сопротивления неотвержденного композита (среды) внешней нагрузке. При этом в моделях необходимо использовать константы, размерные или безразмерные параметры, определяемые экспериментально в зависимости от структурных характеристик полимерно-волоконного материала.

Все рассмотренные в этой главе вопросы по композиционным материалам помогают в той или иной мере построить математическую модель расчета напряженно-деформированного состояния препрегов. Это предопределило начало работы, которая позволяет глубже понять адгезию, трение, остаточные напряжения и концентрацию напряжений и др., а также найти способы снижения их влияния на прочностные характеристики готовых изделий. Практическое использование результатов разработок имеет своей целью широкое непосредственное внедрение их в технологический процесс с целью повышения прочностных свойств и

качества изделий, снижения их себестоимости. Результаты проведенных исследований уже нашли применение в производственной практике изготовления изделий из гетерогенных полимерных материалов.

Изложенный в данной работе способ расчета напряженного состояния препрегов позволяет определять напряжения поперечного сжатия и растяжения в каждом семействе нитей. При этом напряжения могут достигать предельных значений, при которых наступает момент разрушения армирующего материала.

Оценка таких напряжений и их влияния на напряженно-деформированное состояние изделия после отверждения связующего представляют собой отдельную область для дальнейшего исследования.

1.18. Классификация и характеристики стеклопластиков

Ниже приведены характеристики материалов конструкций из стеклопластиков, изготавливаемых на предприятии ООО «Авангард», г. Сафоново. Величины показателей отражают уровень технологии, достигнутой на предприятии. Все стеклопластики можно классифицировать по способу изготовления: намоточные, прессованные, вакуумформованные и ручного формования. По способу отверждения: горячего отверждения в специальных печах и холодного отверждения (при температуре цеха). По составу: наполнители и связующие. Величины показателей имеют средние значения для достигнутого уровня производства. Величины показателей определялись в центральной заводской лаборатории по ГОСТ и ОСТ приведенных в таблице 1.20.

Таблица 1.20

Нормативные документы по определению физико-механических показателей композитов

Обозначение показателя	Наименование показателя	Нормативный документ
1	2	3
E_1	Модуль упругости при растяжении в осевом направлении (уток), МПа	ГОСТ 9550-81
E_2	Модуль упругости при растяжении в кольцевом направлении (основа), МПа	

Окончание табл. 1.20

1	2	3
E_{u1}	Модуль упругости при изгибе в осевом направлении (уток), МПа	ГОСТ 9550-81
E_{u2}	Модуль упругости при изгибе в кольцевом направлении (основа), МПа	
σ_{eu1}	Изгибающее напряжение при разрушении в осевом направлении (уток), МПа	ГОСТ 4648-71
σ_{eu2}	Изгибающее напряжение при разрушении в кольцевом направлении (основа), МПа	
σ_{e1}	Разрушающее напряжение при растяжении в осевом направлении (уток), МПа	ГОСТ 11262-80
σ_{e2}	Разрушающее напряжение при растяжении в кольцевом направлении (основа), МПа	
σ_{-e1}	Разрушающее напряжение при сжатии в осевом направлении (уток), МПа	ГОСТ 4651-82
σ_{-e2}	Разрушающее напряжение при сжатии в кольцевом направлении (основа), МПа	
σ_{ec1}	Разрушающее напряжение при смятии в осевом направлении (уток), МПа	ОСТ 92-1475
σ_{ec2}	Разрушающее напряжение при смятии в кольцевом направлении (основа), МПа	
τ_{ec1}	Разрушающее напряжение при скалывании в осевом направлении (уток), МПа	ОСТ 92-1472-78
τ_{ec2}	Разрушающее напряжение при скалывании в кольцевом направлении (основа), МПа	
τ_{e1}	Разрушающее напряжение при срезе в осевом направлении (уток), МПа	ОСТ 92-1475
τ_{e2}	Разрушающее напряжение при срезе в кольцевом направлении (основа), МПа	
ν_1	Коэффициент Пуассона в осевом направлении (уток), б/р	ОСТ 92-1461-77
ν_2	Коэффициент Пуассона в кольцевом направлении (основа), б/р	
γ	Плотность, г/см ³	ОСТ 92-0903

Показатели механических свойств стеклотканей, полученных методом намотки, представлены в таблице 1.21

Коэффициент Пуассона в осевом направлении (уток), б/р

Таблица 1.21

Показатели механических свойств стеклопластиков
на основе стеклотканей Т-10-14, Т-10-80, Т-13, Т-23П

Обозначение показателя	Т-10—14 + ЭП-5122 горячего отв.	Т-10-80 +ЭТФ горячего отв.	Т-13 + ЭП-5122 горячего отв.	Т-13 + ПН-19М холодного отв.	Т-13 + ЭН-253 горячего отв.	Т-23П-76(100) +ЭН-253 горячего отв.
1	2	3	4	5	6	7
E_1	$1,8 \cdot 10^4$	$1,93 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$0,8 \cdot 10^4$	$1,95 \cdot 10^4$	$1,75 \cdot 10^4$
E_2	$2,2 \cdot 10^4$	$2,36 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$2,55 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$
E_{u1}			$1,8 \cdot 10^4$	$0,63 \cdot 10^4$	$1,46 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$
E_{u2}			$2 \cdot 10^4$	$0,72 \cdot 10^4$	$1,84 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$
σ_{su1}	270	294	270	90	247	400
σ_{su2}	450		450	150	297	542
σ_{e1}	220	303	220	150	296	360
σ_{e2}	450	495	400	180	529	600
σ_{-e1}	160	216	160	50	162	184
σ_{-e2}	300		250	60	250	200
σ_{ec1}	250	245	250	100	250	
σ_{ec2}	250		320	90	320	
τ_{ec1}	30	29	30	15	35	40
τ_{ec2}	30	30	30	13	30	35
τ_{e1}	90	88	80	60	80	114
τ_{e2}	110		80	50	80	180
ν_1	0,11	0,14	0,11		0,11	0,10
ν_2	0,14	0,14	0,14		0,14	0,15
γ	1,75	1,70	1,72	1,72	1,65	1,70

В таблице 1.22 приведены показатели стеклопластиков, полученных методом ручного формования для двух случаев, когда слои ткани уложены так, что основа и уток чередуются. Получается рав-

нопрочный материал. Во втором случае все слои уложены так, что основа каждого слоя имеет одно и то же направление.

Таблица 1.22

Величины показателей механических свойств стеклопластиков, полученных методом ручного формования

Обозначение показателя	T-10-14 + ЭД/Е-20 холодного отв.	STR 024/500/125 +ПН-19М холодного отв.	ТР-0,7-117А +ПН- 19М холодного отв.	ТР-0,7 + ПН-19М холодного отв.	STR + ПН-19М хо- лодного отв.	RT-500 +ПН-19М холодного отв.	STR 010/300/125 +ПН-19М холодного отв.	T-10-14 +ЭД/Е-20 хо- лодного отв.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_1	$1,4 \cdot 10^4$	$1,45 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$	$1,41 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$1,93 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$
E_2	$0,93 \cdot 10^4$							
E_{u1}	$0,95 \cdot 10^4$		$1,1 \cdot 10^4$	$1,17 \cdot 10^4$		$1,3 \cdot 10^4$	$1,65 \cdot 10^4$	$0,8 \cdot 10^4$
E_{u2}	$0,72 \cdot 10^4$							
σ_{eu1}	260	332	219	123	330	300	424	320
σ_{eu2}	438							
σ_{e1}	270	236	173	260	236	250	302	200
σ_{e2}	145							
σ_{-e1}	184	193	120	44	192	160	240	165
σ_{-e2}	146							
σ_{ec1}	245	302	160	115	300	250	380	220
σ_{ec2}	280							
τ_{ec1}	27	27	15	8	27	20	27	27
τ_{ec2}	25							
τ_{e1}		61	50	59	60	60	90	
τ_{e2}								
ν_1						0,3		0,3

Окончание табл. 1.22

<i>l</i>	2	3	4	5	6	7	8	9
v_2								
γ	1,41	1,7	1,7	1,67	1,7	1,64	1,67	1,4

В таблице 1.23 показаны величины показателей характеристик стеклопластиков, получаемых методом вакуумной пропитки под давлением и методом прессования препрегов.

Таблица 1.23

Величины показателей механических свойств стеклопластиков, получаемых методом вакуумной пропитки и прессованием

Обозначение показателя	МТТС-2,1 +ЭДТ-10 холодно-го отв.	МТТС-2,1 +ЭДТ-10 горячего отв.	МТБС-5,2 +ЭДТ-10 горячего отв.	Т-10 + ЭН-253 горячего отв.	Т-13 + ЭП-5122 горячего отв.
<i>l</i>	2	3	4	5	6
E	$0,56 \cdot 10^4$	$1,79 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$	$2,08 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$
E_{ii}	$0,5 \cdot 10^4$			$1,85 \cdot 10^4$	
$\sigma_{ви}$				412	340
σ_{ϵ}	330			382	90
$\sigma_{-\epsilon}$	280	202	94	256	250
$\sigma_{\epsilon c}$	235	328	176	303	
τ_{ϵ}	100	97	82	98	
$\tau_{\epsilon c}$	20	49	38	38	30
v	0,07				0,11
γ	1,7			1,83	

Здесь в таблице в обозначениях параметров опущен индекс $i=1,2$, так как материал стеклопластика равнопрочен. Смысл параметров остается таким же, как и для параметров, приведенных в таблице 1.20.

Однонаправленный стеклопластик получается из ровинга (жгута), представляющего собой некрученую пряжу, состоящую из приблизительно параллельных некрученых комплексных нитей методом намотки на цилиндрические оправки. Второй метод получения однонаправленного стеклопластика – это метод пултрузии. Технология пултрузии состоит в получении непрерывного однонаправленного профиля протяжкой пропитанных связующим армирующих стекломатериалов через нагретую формообразующую фильеру. Характеристики таких однонаправленных стеклопластиков представлены в таблице 1.24.

Таблица 1.24

Величины показателей однонаправленных стеклопластиков

Обозначение параметра	РВМН10-1240-8 +ЭДТ-10 намотка горячего отв.	РБ9-1200 +ЭДТ-10 намотка горячего отв.	РВМПН +ЭДТ-10 намотка горячего отв.	РВМПН +ПН-19М пултрузия горячего отв.
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
E_1	$5,5 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^4$
E_2	$0,9 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$0,9 \cdot 10^4$	$0,3 \cdot 10^4$
E_{u1}		$5,3 \cdot 10^4$		
E_{u2}				
σ_{eu1}				500
σ_{eu2}				70
σ_{e1}	1500	1210	1300	700
σ_{e2}	27	56	26	26
σ_{-e1}	397	844	390	230
σ_{-e2}	72	148	70	60
σ_{ec1}	140	161		
σ_{ec2}				
τ_{ec1}	36	47	30	30
τ_{ec2}				

Окончание табл. 1.24

1	2	3	4	5
$\tau_{\sigma 1}$	218	222		
$\tau_{\sigma 2}$				
V_1			0,28	
V_2				
γ	1,9	1,91	2,1	1,9

Технологические свойства теплозащитного материала сублимирующего типа на основе ткани ТЭМС-К и полимерного связующего ЭХД-у позволили полностью механизировать процесс его изготовления. Ткань ТЭМС-К толщиной примерно 0,30 мм предварительно пропитывается связующим ЭХД-у, затем полотна ткани послойно наматываются на технологическую оправку до требуемой толщины. На теплозащитный материал наматывается стеклопластиковая оболочка и производится полимеризация связующего многослойного пакета. После извлечения технологической оправки получается секция контейнера, содержащая на внутренней поверхности слой теплозащитного материала заданной толщины.

Использование в составе теплозащитного материала и силовой стеклопластиковой оболочки одной и той же полимерной матрицы (ЭХД-у), а также получение теплозащитного слоя методом намотки предварительно пропитанных связующим полотен ткани позволяет обеспечить:

- высокую адгезию разнофункциональных слоев друг к другу;
- высокую стабильность толщины теплозащитного слоя, гарантированную регламентированными параметрами – толщиной и количеством наматываемых слоев ткани ТЭМС-К;
- плотную структуру, так как процесс формирования композиционного материала осуществляется под давлением.

Кроме того, органические волокна, входящие в состав теплозащитного материала, придают ему эластичность, что является важным качеством для контейнеров, работающих в условиях высоких знакопеременных деформаций.

Указанный выше комплексный подход к выбору теплозащитного материала в конструкции пускового контейнера потребовал исследования ряда свойств: теплофизических, теплозащитных, физико-механических, электростатических и антифрикционных в исходном состоянии.

Результаты исследования свойств теплозащитного материала на основе ткани ТЭМС-К и связующего ЭХД-у представлены в таблице 1.25.

Таблица 1.25

Показатели свойств теплозащитного материала ТЭМС-К + ЭХД-у

Наименование показателя	В исходном состоянии
Теплофизические и теплозащитные свойства	
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,184
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	1,150
Температуропроводность, м ² /с	$0,196 \cdot 10^{-6}$
Плотность, кг/м ³	1180
Удельная эффективная энтальпия, Дж/кг	$3,5 \cdot 10^{-6}$
Температура во фронте уноса, К	970
Физико-механические свойства	
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа основа (кольцевое) уток (осевое)	39,9
	123,7
Модуль упругости при растяжении, МПа основа (кольцевое) уток (осевое)	$0,203 \cdot 10^4$
	$0,22 \cdot 10^4$
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа основа (кольцевое) уток (осевое)	64,8
	72,2
Разрушающее напряжение при скалывании по слоям, МПа основа (кольцевое) уток (осевое)	18,9
	17,2
Адгезионная прочность при сцеплении со стеклопластиком на основе ткани ТСУ 8/3-ВМ78 и связующего ЭХД-у, МПа	13,3
Электростатические свойства	
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	$0,15 \cdot 10^3$
Удельное электрическое поверхностное сопротивление, Ом/м ²	$0,20 \cdot 10^3$
Антифрикционные свойства (в паре с покрытием ОБП)	
Коэффициент трения скольжения	0,090

В таблице 1.26 представлены характеристики композита, получаемого при изготовлении емкостного оборудования и газоотводящих стволов дымовых труб на основе тканей Т-13, Т-10-14.

Таблица 1.26

Физико-механические характеристики композита

Наименование	Стеклопластик намоточный на эпоксифенольном связующем горячего отверждения (тканевая намоткапрепрегом)	Стеклопластик намоточный на эпоксивинилэфирном связующем холодного отверждения (филаментная намотка)	Стеклопластик формованный на эпоксивинилэфирном связующем холодного отверждения (ручная формовка)
1	2	3	4
Модуль упругости при растяжении: – в осевом направлении, МПа; – в кольцевом направлении, МПа	1,8·10 ⁴ 2,2·10 ⁴	(1,0÷1,4)·10 ⁴ (2,0÷3,0)·10 ⁴	1,2·10 ⁴
Предел прочности при растяжении: – в осевом направлении, МПа; – в кольцевом направлении, МПа	220 420	100÷150 450÷500	
Разрушающее напряжение при сжатии: – в осевом направлении, МПа; – в кольцевом направлении, МПа	160 220	120÷140 140÷200	
Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа	30	25÷30	25÷30
Температура тепловой деформации, °С	180÷190	100÷180	100÷180
Плотность, г/см ³	1,75–1,8	1,65–1,8	1,65–1,75
Коэффициент линейного теплового расширения, 1/град	(17±20)·10 ⁻⁶		

1	2	3	4
Температура стеклования, °С	210	130÷190	130÷190
Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	0,8÷0,9		
Водопоглощение, %	0,2÷ 0,5		
Адгезия (межслойный отрыв), МПа	8÷10	5÷8	
Трудногорючий	по ГОСТ 12.1.044-89		
Химическая стойкость	Стоек к воздействию кислот, щелочей, окислителей, растворителей, отбеливателей, нефтепродуктов. Стоек к воздействию: газовых потоков, содержащих CO ₂ 10-16%, O ₂ 2,75-3,2%, N ₂ 72,84-87,25%, пары воды, содержащие CO 214 мг/м ³ , NO _x 350 мг/м ³ , H ₂ S 26 мг/м ³ , SO ₂ 0,25% от объема при температуре до 180°С		
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	10 ¹²		

Литература

1. Проектирование деталей из пластмасс: справочник / И.А.Альшильц, Н.Ф. Анисимов, Б.Н. Благов; под ред. И.А. Альшильца. – Москва: Машиностроение, 1969. – 248 с.
2. Киселев, Б.А. Стеклопластики / Б.А. Киселев. – Москва: Госхимиздат, 1961. – 140 с.
3. Цыплаков, О.Г. Основы формования стеклопластиковых оболочек / О.Г.Цыплаков. – Ленинград: Машиностроение, 1968. – 176 с.
4. Маллинсон, Дж. Применение изделий из стеклопластиков в химических производствах / Дж. Маллинсон; пер. с англ. под ред. В.И. Альперина и С.М. Перлина. – Москва: Химия, 1973. – 240 с.
5. Тарнопольский, Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис. – 3-е изд. – Москва: Химия, 1981. – 263 с.
6. Калинин, В.А. Применение пластмасс в машиностроении / В.А. Калинин // Сб. науч. тр./ МВТУ. – Москва, 1970. – №10. – С. 30-33.

7. Тарнопольский, Ю.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков / Ю.М. Тарнопольский, А.М.Скудра. – Рига: Зинатне, 1966. – 260 с.
8. Альперин, В.И. Конструкционные стеклопластики / В.И.Альперин. – Москва: Химия, 1979. – 360 с.
9. Шалун, Г.Б. Слоистые пластики / Г.Б. Шалун, Е.М. Сурженко. – Ленинград: Химия, 1978. – 232 с.
10. Князев, В.К. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении / В.К. Князев. – Москва: Машиностроение, 1977. – 181 с.
11. Энциклопедия полимеров // Советская энциклопедия: в 3-х т. – М., 1972. – т.1. – С. 341 – 362.
12. Боголюбов, В.С. Формообразующая оснастка из полимерных материалов / В.С. Боголюбов. – Москва: Машиностроение, 1979. – 183 с.
13. Справочник по пластмассам: в 2 т. / В.М. Катаев [и др.]; под общ. ред. В.М. Катаева. – 2-е изд. – Москва: Химия, 1975. – т. 2.
14. Седов, Л.Н. Насыщенные полимеры / Л.Н. Седов, З.В. Михайлова. – Москва: Химия, 1977. – 232 с.
15. Ли, Х. Справочное руководство по эпоксидным смолам / Х. Ли, К. Невил; пер. с англ. под ред. Н.В. Александрова. – Москва: Энергия, 1973. – 415 с.
16. Николаев А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. М.-Л., Химия, 1966.
- 17.Связующее для стеклопластиков / Под. ред. Королькова Н.В. – М.: Химия. – 1975.
18. Петров Г.С., Крылатская Р.С. – Пром.орг.хим., 1935, № 7, с.703.
19. Лосев И.П., Тростянская Е.Б. Химия синтетических полимеров. Изд. 3-е. М., Химия.: 1971.
20. Кремнийорганические продукты, выпускаемые в СССР. Каталог-справочник / Под.ред. Горбунова А.Н. М., Химия, 1975.
21. Справочник по пластическим массам / Под ред. Катаева В.М., Попова В.А., Сажина Б.И. Т. II. М., Химия, 1975, с. 113.
22. Шнелл Г. Химия и физика поликарбонатов. М., Химия, 1967.
23. Методические рекомендации по крашению стеклопластиков. М., ВНИИСПВ, 1975.

24. Способ получения отверстий в композиционном материале: а.с. / А.В.Колганов, В.М. Сахоненко. – № 4124593/23-05; заявл. 31.07.86; опубл. 22.08.88.
25. Воробьев, В.В. Соединения конструкций из композиционных материалов / В.В.Воробьев, О.С.Сироткин. – Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1985. – 165 с.
26. Кюппер, А.Б. Кратковременная статическая прочность болтового соединения конструкций из стеклопластика / А.Б. Кюппер // Вестник машиностроения. – 1966. – № 11. – С. 36-40.
27. Немец, Я.В. Прочность пластмасс / Я.В.Немец, С.Б. Серенсен, В.С. Стреляев; под ред. Я.В. Немец. – Москва: Машиностроение, 1970. – 132 с.
28. Технологические процессы и оборудование для выполнения соединений в конструкциях самолетов / В.П. Григорьев [и др.]; под общ. ред В.П. Григорьева. – Ташкент: ФАН, 1971. – 215 с.
29. Сироткин, О.С. Экспериментальное исследование упругих и прочностных характеристик соединений углепластиков в свободном и стесненном состоянии / О.С.Сироткин, С.Ф. Растринин, В.А. Козлов // Сб. науч.тр. / ЦАГИ. – Москва, 1979. – Вып.7: Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. – С. 256–303.
30. Horris, C.B. Strength of combined stress / C.B. Horris // Forestry Products Report. – 1950.
31. Schteget, H. Verbindungen von Bauteilen aus Glass fasserverstärker / H. Schteget // Polyesther Plaste und Kautschuk. – 1964.– № 7.
32. Wright, J.H. Design Notes for glass Reinfor Plastles / J.H. Wright, R.D. Downan // Journal Air craft Engineering. – 1959.
33. Догматырский, В.А. Болтовые и заклепочные соединения стеклопластиков / В.А.Догматырский, О.С. Сироткин, А.И. Ярковец; под ред. В.А. Догматырского. – Москва: МАИ, 1972. – 189 с.
34. Томашевский, В.Т. Свойства и технология металлопластиков / В.Т.Томашевский, В.Н.Шалыгин, А.К.Сборовский, В.П.Асташкин. – Л.,1979. – 148 с.
35. Ткань конструктивного назначения. Технические условия: ГОСТ 19170-2001.

36. Миткевич, А.Б. 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.
37. Ефремов Д.Е. Теория переплетений. Часть 1. Главные производные переплетения [Текст]. Иваново.: ИГТА, 2007. – 33 с.
38. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / М.Л. Кербер [и др.]; под общ. ред. А.А. Берлина.– СПб.: Профессия, 2008. – 560 с., ил.
39. Хиладжинов, К.В. Мультиаксиальные ткани «Армент» компании «Стеклонит» / К.В. Хилиджанов // Композитный мир. – 2008 (18). – № 5. – С. 10-13.
40. Ермаков, А.С. Оборудование швейных предприятий / А.С.Ермаков. – Москва: ИРПО: Проф Обр Издат, 2002. – 432 с.
41. Франц, В.Я. Оборудование швейного производства / В.Я.Франц. – Москва: Издательский центр «Академия», 2002. – 448 с.
42. Савостицкий, А.В. Технология швейных изделий. 2-е издание перераб. и доп. / А.В.Савостицкий, Е.Х. Меликов. – Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 440 с.
43. Болотин, В.В. Расчет остаточных напряжений и деформаций в намоточных изделиях из армированных пластиков / В.В. Болотин, К.С. Болотина // Механика полимеров. – 1969. – № 1. – С. 17-19.
44. Болотин, В.В. Влияние технологических факторов на механическую надежность конструкций из композитов / В.В. Болотин // Механика полимеров. – 1972. – № 3. – С. 6-9.
45. Болотин, В.В. Об усадке эпоксидных связующих в процессе отверждения / В.В. Болотин, К.С. Болотина // Механика полимеров. – 1972. – № 1. – С. 12-13.
46. Болотин, В.В. Термоупругая задача для кругового цилиндра из армированного слоистого материала / В.В. Болотин, К.С. Болотина // Механика полимеров. – 1967. – № 1. – С. 16-18.
47. Николаев, В.П. К расчету остаточных напряжений в намоточных изделиях из стеклопластиков / В.П. Николаев, В.М. Инденбаум // Механика полимеров. – 1970. – № 6. – С. 12-14.
48. Гарнопольский, Ю.М. Изменение усилия натяжения при намотке деталей из стеклопластиков / Ю.М. Гарнопольский, Г.Г. Портнов // Механика полимеров. – 1966. – № 2. – С. 5-7.

49. Бидерман, В.Л. Определение остаточных напряжений для изготовления колец из стеклопластика / В.Л. Бидерман, И.П. Дмитриенко, В.И. Поляков, Н.А. Сухова // Механика полимеров. – 1969. – № 5. – С. 11-14.

50. Макаров, Б.П. К расчету остаточных напряжений в цилиндрах из стеклопластика при неравномерном распределении связующего / Б.П. Макаров, В.М. Инденбаум // Динамика и прочность машин: науч.тр./ МЭИ. – Москва, 1970. – вып.74. – С 24-27.

51. Портнов, Г.Г. Расчет остаточных напряжений в намоточных изделиях из стеклопластика при переменных по толщине характеристиках материала / Г.Г. Портнов, В.А. Поляков, Б.П. Макаров, В.М. Инденбаум // Механика полимеров. – 1971. – № 4. – С. 19-21.

52. Благонядежин, В.Л. Результаты экспериментального исследования остаточных напряжений в намоточных изделиях из стеклопластика / В.Л. Благонядежин, Г.В. Мишенков, В.П. Николаев // Механика полимеров. – 1970. – № 6. – С. 9-12.

53. Благонядежин, В.Л. Результаты экспериментального исследования остаточных напряжений в намоточных изделиях из стеклопластика при малом начальном усилии натяжения стеклоленты / В.Л. Благонядежин, Г.В. Мишенков, В.П. Николаев, Е.М. Варушкин // Динамика и прочность машин: науч.тр. / МЭИ. – Москва, 1970. – вып. 74. – С. 17-21.

54. Перевозчиков, В.Г. Исследование остаточных напряжений в намоточных изделиях из стеклопластика / В.Г.Перевозчиков // Теплоэнергетика и энергомашиностроение: науч.тр./ МЭИ. – Москва, 1972. – вып. 104. – С. 4-6.

55. Благонядежин, В.Л. О влиянии режима намотки на остаточные напряжения в намоточных изделиях из стеклопластиков / В.Л. Благонядежин, Г.В. Мишенков, В.П. Николаев, Е.М. Варушкин, Ю.А. Лапин // Динамика и прочность машин: науч.тр./ МЭИ. – Москва, 1970. – вып. 74. – С. 33-36.

56. Инденбаум, В.М. Расчет остаточных напряжений в многослойных цилиндрах из комбинированных композитов / В.М. Инденбаум // Динамика и прочность машин: науч.тр./ МЭИ. – Москва, 1973. – вып. 164. – С. 14-16.

57. Благонядежин, В.Л. Остаточные напряжения в кольцах из стеклопластика, полученных методом послойного отверждения /

В.Л. Благонядежин, В.Г. Перевозчиков // Механика полимеров. – 1972. – № 1. – С. 10-13.

58. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – Москва: Машиностроение, 1963. – 97 с.

59. Определение характеристик препрегов при сжатии / Ю.В. Василевич, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, К.А. Горельий, Е.В. Малютин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 2 (19). – С. 53 – 57.

60. Сахоненко С.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния препрегов для нахождения максимальных напряжений вблизи проколота круглого отверстия: диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.- мат.наук: 6.03.09 / С.В. Сахоненко. – Минск, 2009. – 154 л.

61. Игла для прокалывания отверстия: а.с. / Л.Я. Эйдельман. – № 78397; заявл. 30.07.47; опубл.1.12.50.

62. Оправка для формования заготовок секций контейнера из слоистого композиционного материала с проколотыми отверстиями: а.с. / И.А. Егоренков, Г.А. Веденин, М.А. Комков. – № 134383; заявл. 4.12.77; опубл. 7.09.79.

63. Способ образования отверстий в изделиях из армированных пластмасс: а.с. / Е.П. Либерт, В.М. Сахоненко. – № 1431952; заявл. 01.09.86; опубл. 22.06.88.

64. Способ получения отверстий в композиционном материале: а.с. / А.В. Колганов, В.М. Сахоненко. – № 1445978; заявл. 31.07.86; опубл. 22.08.88.

65. Способ изготовления отверстий в изделиях из композиционных материалов: а.с. / Е.П. Либерт, В.М. Сахоненко. – № 1599219; заявл. 06.06.88; опубл. 15.06.90.

66. Комков, М.А. Формование отверстий в композитных конструкциях методом прокалывания неотвержденного материала / М.А. Комков, А.В. Колганов // Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы: материалы 2-й международной научной конференции, Москва, МГТУ, 18-21 ноября 2003 г.

67. Комков, М.А. Моделирование процесса формования отверстий в изделиях из неотвержденного полимерно-волоконистого материала / М.А. Комков, А.В. Колганов // Вестник машиностроения МВГТУ им. Баумана. – 2004. – № 8. – С. 15-18.

68. Патент № 2745308 США; кл. 85-13. – 1956.

69. Патент № 2759389 США; кл. 85-21. – 1956.
70. Патент № 3357875 США; кл. 156-425. – 1963.
71. Патент № 3021241 США; кл. 264-258. – 1965.
72. Патент № 149292 Великобритании; кл. В 29 D 22/14. – 1976.
73. Liu, C.J. Residual stresses in filament wound laminates and optimum programmed winding tension / C.J. Liu, C.C. Chamis // Proc. SPI, 20 – the Annual Conference, sect. 5-D. – 1965.
74. Варушкин, Е.М. Влияние технологического натяжения на распределение остаточных напряжений в намоточных изделиях из стеклопластика / Е.М. Варушкин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1972. – № 1. – С. 5-6.
75. Портнов, Г.Г. Расчет остаточных напряжений в намоточных изделиях из стеклопластика при переменных по толщине характеристиках материала / Г.Г. Портнов, В.А. Поляков, Б.П. Макаров, В.М. Инденбаум. // Механика полимеров. – 1969. – № 3. – С. 19-23.
76. Fink, B. Development of reinforced plastics hull structures for deep diving submersible vehicles / B. Fink // Proc. SPI, 20 – the Annual Conference, sect. 1-A. – 1965.
77. Desei, R. The effect of filament winding process variables on the performance of carbon of fiberglass reinforced NOL rings / R. Desei, J. Kalnin // Proc. SPI, 24 – the Annual Conference, sect. 8-E. – 1969.
78. Chahg, L.-W. Notched strength of woven fabric composites with molded-in holes / L.-W. Chahg, S.-S Yau, T.-W. Chou // Composites. – 1987. – № 18 (3). –Р. 233-241.
79. Оправка для изготовления изогнутых трубчатых изделий из композиционных материалов: а.с. / Б.П. Муленков и др. – № 2177877; заявл. № 2001111145/22, опубл. 12.04.2001.
80. Горелый К.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния в торовых оболочках, изготавливаемых из гетерогенных полимерных материалов: диссертация на соискание ученой степени кандидата техн.наук: 26.10.12 / К.А. Горелый. – Минск, 2012. – 118 л.
81. Тканые конструкционные композиты. Пер.с англ./ Под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко. – М: Мир, 1991. – 432 с., ил.
82. 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.

83. 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.

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

85. Васильев, В.В. Соотношения нелинейной механики композитных материалов / В.В. Васильев, С.А. Солдатов // Механика композитных материалов. – Рига: РПИ, - 1979. – С. 3 -8.

86. Черевацкий, С.Б. Способ изготовления оболочечных конструкций из композиционных материалов / С.Б. Черевацкий [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 15. – 1984. – Вып. 4 (56). - С. 23 – 26.

87. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. М., Наука, 1970.

88. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига, Зинатне, 1966.

89. Розен Б.В. В кн.: Волокнистые композиционные материалы. Пер. с англ. / Под ред. Бокштейна С.З. М., Мир, 1967, с. 54-96.

90. Outwater J.O. ASME Paper, 1956, A, v. 56, p. 201-208.

91. Кортен Х.Т. В кн.: Современные композиционные материалы. Пер. с англ. / Под ред. Светлова И.А. М., Мир, 1979 с. 41-140.

92. Скудра А.М., Антанс В.П. Механ.полимер., 1968, № 5, с. 844-852.

93. Канович М.З., Колтунов М.А., Рогинский С.Л., Механ. полимер., 1973, № 4, с. 655-660.

94. Рогинский С.Л., Колтунов М.А., Натрусов В.И., Канович М.З., Асланова М.С. Механика полимеров. 1974, № 4, с. 743-746.

95. Кортен Х.Т. Разрушение армированных пластиков / Пер. с англ. под ред. Р.М.Тарнопольского. М.: Химия, 1967.

96. Практикум по технологии переработки пластических масс / Под.ред. Виноградова В.М., Головкина Г.С. – М.: Химия, 1980. – 240 с.

97. Трофимов Н.Н., Канович М.З. Основы создания полимерных композитов. – М.: Наука, 1999, 539 с.

98. Рогинский С.Л., Натрусов В.И., Канович М.З. Механизм разрушения композиционных материалов // Тез.докл. на IV Всесоюз. науч.-техн. совещ. «Свойства, переработка и области применения стеклопластиков» Л., 1972.

99. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. М.: Наука, 1970, 481 с.

100. Рогинский С.Л., Канович М.З., Натрусов В.И. Основные принципы создания высокопрочных ориентированных стеклопластиков // Технология, физико-технические свойства и применение стеклопластиков. М., 1975. С. 3-17.

101. Канович М.З. Некоторые вопросы теории монолитности ориентированных стеклопластиков и получения высокопрочных стеклопластиков // Стеклопластик и стеклопластики. М., 1970. С. 17-22.

102. Рогинский С.Л., Натрусов В.И., Канович М.З. и др. О влиянии диаметра стеклянного волокна на прочность стеклопластика при сжатии // Механика полимеров. 1972. № 4. С. 626-630.

103. Канович М.З., Рогинский С.Л., Колтунов М.А. Исследование плотности укладки волокон в однонаправленном композите // Механика полимеров. 1976. № 3. 538 с.

104. Канович М.З., Рогинский С.Л., Натрусов В.И. Влияние геометрии армирующих волокон и их упаковки на прочность стеклопластика // Пласт.массы. 1973. № 2. С. 60-63.

105. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. М. – Л., Машиностроение, 1972.

106. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия, 1975.

107. Спортсмен В.Н., Гуртовник И.Г., Политыко Ж.П. и др. – В кн. Стеклопластик и стеклопластики. М., НИИТЭХИМ, 1977, вып.1, с. 32.

108. Тарнопольский Ю.М. – Механика полимеров, 1972, № 3, с. 541-542.

109. Ашкенази Е.К. Анизотропия машиностроительных материалов. М. – Л., Машиностроение, 1969.

110. Ашкенази Е.К., Морозов А.С. Зав.лаб., 1976, т.42, № 6, с. 731-735.

111. Bock E. «Kunststoffe», 1954, Bd. 44, № 12, S. 581-588.
112. Буров А.К., Андреевская Г.Д. Высокопрочные стеклопластики. М., Изд-во АН СССР, 1961.
113. Андреевская Г.Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики. М., Наука, 1966.
114. Jellinek K. – Kunststoffe, 1965, Bd. 55, № 2, S. 71-74.
115. Wende F., Moebes W., Marten H. Glasfaserverstärkte Plaste. Leipzig, 1963.
116. Барг Э.И. Технология синтетических пластических масс. М., Химия, 1954.
117. Brookfield K., Pickthall D., Warburton R. Plastics, 1961, v. 26, № 287, p. 149-153.
118. Егоров Н.Г., Рогинский С.Л. Пласт.массы. 1965, № 7, с. 49-50.
119. Альперин В.И., Корольков Н.В., Мотавкин А.В., Рогинский С.Л., Телешов В.А. Конструкционные стеклопластики. М.: Химия, 1979, 360 с.
120. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление жестких полимерных материалов. Рига, Зинатне, 1972.
121. СНиП 11-А.1071. Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования. М., Стройиздат, 1972.
122. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., Наука, 1976.
123. Зуев Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. М., Химия, 1972.
124. Трофимов Н.Н. // Пласт.массы. 1987. № 1. С. 53-54.
125. Трофимов Н.Н., Канович М.З. // ЖВХО. 1989. Т.34. № 5. С. 447-453.
126. Михальский А.И. // Итоги науки и техники. М.; ВИНТИ. 1984. Т.19. С. 151-222. Сер. Химия и технология ВМС.
127. Трофимов Н.Н. // Тр. Всесоюз.конф.по композиционным матери-алам. Ташкент: Фан, 1986. С. 29-36.
128. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии материалов. М.: Химия. 1974.
129. Плюдеман Э. Поверхность разделав полимерных компози-тах. М.: Мир. 1978.

130. Энциклопедия полимеров М.: Сов.энциклопедия. 1972. Т.1. С. 22-29.
131. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. Адгезия. М.: Наука, 1949.
132. Воюцкий С.С. Аутогезия и адгезия высокополимеров. М., 1960.
133. Salk S.H., Suck A.H., Chen T.S., et al. // Theor. Chim. Acta. 1986. Vol. 70. N 1. P. 3-10.
134. Киселева А.В., Лыгин В.И., Хлопова З.Т. // Журн. физ. химии. 1985. Т. 59. № 11. С. 2878-2880.
135. Каленчук К.Н., Канович М.З., Трофимов Н.Н. // ДАН СССР. 1990. Т. 312. № 6. С. 1395-1398.
136. Эпоксидная композиция ангидридного отверждения с применением латентного инициатора И-120У: пат. Российской Федерации, RU 2496810 С2 / В.М.Емельянов, И.Ю.Щеглов, К.А.Горелый, Е.В.Малютин; заявитель ОАО «Авангард». – 2011151270/05; заявл.14.12.2011; опубл.27.06.2013 // Бюл. №18 / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2013. – № 30. – С.109.
137. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В.Крагельский. – М.: Машиностроение, 1962. – 370 с.
138. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов / В.Е.Гмурман. – М.: Высшая школа, 1977. – 479 с.
139. Тарнопольский, Ю.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков / Ю.М. Тарнопольский, А.М. Скудра. – Рига: Зинатне, 1966. – 260 с.
140. Тендлер, В.В. Новые методы изготовления судовых деталей из стеклопластиков / В.В.Тендлер. – Ленинград: Судостроение, 1969. – 80 с.
141. Стекланные волокна / М.С.Асланова [и др.]; под общ.ред. М.С.Аслановой. – Москва: Химия, 1979. – 256 с.
142. Экономика производства и применения стеклопластиков / И.В. Рахлин [и др.]; под общ.ред. И.В. Рахлина. – Москва: Химия, 1972. – 240 с.
143. Калинчев, В.А. Намотанные стеклопластики / В.А. Калинчев, М.С. Макаров. – Москва: Химия, 1986. – 272 с.
144. Альперин, В.И. Конструкционные стеклопластики / В.И. Альперин. – Москва: Химия, 1979. – 360 с.

145. Применение конструкционных пластмасс в производстве летательных аппаратов / А.Л. Абибов [и др.]; под общ. ред. А.Л. Абибова. – Москва: Машиностроение, 1971. – 380 с.
146. Ашкенази, Е.К. Анизотропия конструкционных материалов / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – Ленинград: Машиностроение, 1972. – 216 с.
147. Проектирование деталей из пластмасс: справочник / И.А. Альшильц, Н.Ф. Анисимов, Б.Н. Благов; под ред. И.А. Альшильца. – Москва: Машиностроение, 1969. – 248 с.
148. Цыплаков, О.Г. Производство судовых крупногабаритных изделий из стеклопластика / О.Г. Цыплаков. – Ленинград: Судостроение, 1967. – 140 с.
149. Киселев, Б.А. Стеклопластики / Б.А. Киселев. – Москва: Госхимиздат, 1961. – 140 с.
150. Цыплаков, О.Г. Основы формования стеклопластиковых оболочек / О.Г.Цыплаков. – Ленинград: Машиностроение, 1968. – 176 с.
151. Шалун, Г.Б. Слоистые пластики / Г.Б.Шалун, Е.М. Сурженко. – Ленинград: Химия, 1978. – 232 с.
152. Морган, Ф. Стеклопластики / Ф.Морган; пер. с англ. под ред. Я.Д. Авраана. – Москва: Издательский центр «Издательство «ИЗДАТЕЛЬСТВО», 1961. – 481 с.
153. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / И.М. Буланов, Воробей В.В. – М.: Из-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 516 с.
154. Concise encyclopedia of composite materials / Editor Anthony Kelly, The MIT Press, Cambridge, 1989. - P. 321.
155. Handbook of Composites / Edited by S.T.Peters, Chapman and Hall, London, 1998. - P. 1119.
156. Справочник по композиционным материалам: кн. 2 / под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с.
157. Pultrusion for Engineers / Edited by Trevor F. Start. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, 2000. - P. 303.
158. A Stronger Profile for the Future / 6-th World Pultrusion Conference Proceedings, Praga, 2002.
159. Composite Profiles – Save Energy / Global Pultrusion Conference Proceedings, Baltimore, 2007.
160. Jansen K. Radius – Pultrusion Widens the borders of profile manufacturing // Jec composites magazine, - 2009. - № 47. – P. 59 – 60.

161. Росато, Д.В. Намотка стеклонитью / К.С. Грове, Д.В. Росато – М.: Машиностроение, 1969. – 310 с.
162. Композиционные материалы: справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин [и др.]; под ред. В.В.Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
163. Воробей, В.В. Технология непрерывной намотки нитью / В.В.Воробей, Н.Г. Мороз. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 180 с.
164. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / редкол.: А.Г.Братухин [и др.]. – М.: Готика, 2003. – 516 с.
165. Крысин, В.Н. Технологические процессы формообразования, намотки и склеивания конструкций / В.Н.Крысин, М.В. Крысин. – М.: Машиностроение, 1989. - 240 с.
166. Образцов, И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов / В.А. Бунаков, В.В. Васильев, И.Ф.Образцов. –М.: Машиностроение, 1977. - 144 с.
167. Калинин, В.А. Технология производства ракетных двигателей твердого топлива : учеб. пособие / В.А. Калинин, Д.А. Ягодников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. – 687 с.
168. Несущий элемент из композиционно-волокнутого материала типа бруса или опорного шпангоута : а.с. 1320359 СССР, МПК4 E04C2/2, E04C3/29 / А.К. Добровольский [и др.]. - № 3955985; заявл. 12.07.85; опубл. 30.06.87// Бюл. № 24.
169. Торовый опорный шпангоут : а.с. 870634 СССР, МПК3 E04C2/24 / И.А.Егоренков [и др.]. - № 2808065/29 – 83; заявл. 06.07.1979; опубл. 07.10.81 // Бюл. № 37.
170. Васильев, В.В. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов / В.В.Васильев, А.А.Добряков, А.А.Дудченко, Г.А.Молодцов, Ю.С.Царахов. – М.: Изд-во МАИ, 1985. – 218 с.
171. Прогрессивные конструкции подкрепляющих и стыковочных шпангоутов агрегатов ракет: сб. трудов / ЛМИ «Проектирование и технология изготовления изделий из ПКМ»; редкол.: Р.С.Зиновьев [и др.]. - Л., 1987.
172. Томашевский, В.Т. Свойства и технология металлопластиков / В.Т.Томашевский, В.Н.Шалыгин, А.К.Сборовский, В.П.Асташкин. – Л., 1979. - 148 с.

173. Способ повышения прочности армирования полимеров при межслоевом сдвиге и трансверсальном отрыве: межвуз. сб. научн. трудов / ППИ «Полимерные материалы в машиностроении»; редкол.: В.Н.Шалыгин [и др.]. – 1977. – С. 134 – 140.

174. Опорный шпангоут из композиционного материала: а.с. 1318760 СССР, МПК4 F16/19/12, E 04C2/24 / В.В. Мерзляков. – № 397092; заявл. 14.11.86; опубл. 23.06.87 // Бюл. № 23.

175. Опорный шпангоут из композиционного материала: а.с. 1379555 СССР, МПК4 F16L9/12 / В.В. Мерзляков [и др.]. – № 4114217; заявл. 07.05.86; опубл. 07.03.88 // Бюл. № 9.

176. Опорный шпангоут из композиционного материала: а.с. 1392297 СССР, МПК4 F16L9/12, E 04C2/24 / В.В. Мерзляков. – № 4007539/29 – 33; заявл. 10.01.86; опубл. 30.04.88 // Бюл. № 16.

177. Фридман О.А., Каменский И.В., Акутин М.С. – Пластмассы, 1969, № 12, с. 19-21.

178. Карсанов И.Н., Мустафаев А.Д. – Пласт.массы, 1967, № 12, с. 55-58.

179. Половинченко А.И. и др. – Пластмассы, 1969, № 5, с. 46-49.

180. Карсанов И.Н. – Пластмассы, 1966, № 9, с. 66-68.

181. Пик И.Ш., Сандаровская А.С. – Пластмассы, 1960, № 4, с. 30-31.

182. Мотавкин А.В., Мартынов В.Н., Телешов В.А. – Механ.полимер., 1973, № 3, с. 505-517.

183. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М., Металлургия, 1970.

184. Скудра А.М., Булаве Ф.Е., Роценс К.А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига, Зинатне, 1971.

185. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. М., Наука, 1970.

186. Мотавкин А.В., Калинка Ю.А. – В кн.: Механика композиционных материалов. Рига, РПИ, 1977, вып. 1, с. 124.

187. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. М., Наука, 1967.

ГЛАВА 2. УПРУГОЕ И НЕУПРУГОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОПИТАННЫХ ТКАНЕЙ (ПРЕПРЕГОВ)

2.1. Введение

Деформационное поведение препрегов можно условно разделить на два вида. В первом случае препрег деформируется так, что в узлах переплетения отсутствует сдвиг нитей. В таких условиях нагружения препреги испытывают растягивающие деформации в направлении армирования и сжимающие деформации поперек армирования, связанные с изменением угла между семействами нитей в результате их поворота. Такое сжатие не приводит к потере устойчивости, так как оно происходит внутри каркаса ткани и уравновешивается растягивающими усилиями в нитях второго семейства. Оно отличается от обычного объемного сжатия, принятого в теории упругости твердого тела. Эти усилия возникают, если пропитанные ткани используются в качестве основного воспринимающего нагрузку композита в различных конструкциях, палатках, парашютах, тормозных парашютах высокоскоростных самолетов, пуленепробиваемых жилетах и предохранительных сетках [1–3]. Аналогичные деформации также испытывают эластичные композиты – это материалы, у которых матрица из эластомера армирована волокнами или тканью. Такие композиты используются в пневматических шинах и подушках, упругих муфтах, эластичных диафрагмах и мембранных конструкциях различных типов. Характерная особенность подобных изделий, отличающая их от композитов на жестких связующих, состоит в том, что жесткость резиновой матрицы значительно ниже, чем у армирующих волокон, что позволяет считать волокна практически нерастяжимыми при создании теории нерастяжимого кордного каркаса диагональной шины. Теория на основе такого допущения позволяет вывести простейшие формулы для расчета модулей упругости перекрестно-армированных композитов.

Второй случай нагружения препрегов является основным и поэтому наиболее общим. Он предусматривает сдвиг нитей в местах их переплетения, например, при проколе отверстий в препрегах. Такой сдвиг сопровождается появлением сил трения, препятствующих сдвигу. Этими силами трения пренебречь нельзя. Они значи-

тельны и оказывают большое влияние на состояние равновесия, которое наступает после сдвига. В первом случае при повороте сегментов нитей друг относительно друга тоже возникают силы трения при вращении. Однако они настолько малы, что ими можно пренебречь, так как они практически не влияют на состояние равновесия.

Очевидно, во втором случае уравнения, определяющие напряженно-деформированное состояние препрегов, должны в корне отличаться от тех, которые выведены для эластичных композитов. Кроме того, должны различаться и уравнения, связывающие напряжения и деформации, так как в этом случае они должны предусматривать в себе и неупругие деформации, которые могут отличаться от упругих в несколько десятков раз. Особенно это касается области сжимающих деформаций.

Построение математических моделей для обоих случаев деформативности препрегов является насущной задачей. Причем общая теория для таких задач невозможна из-за радикальных различий, происходящих внутри препрегов при их деформировании. В первом случае анизотропные упругие свойства и прочность эластичных композитов исследовались многими авторами теоретически и экспериментально с начала 1920-х годов, когда Чипел [4] рассчитал напряжения в волокнах пневматических шин под давлением.

Эластичные композиты характеризуются практически несжимаемой резиновой матрицей, жесткость которой значительно меньше, чем у армирующих волокон. Для упрощения расчета эластичных композитов с однонаправленными кордными нитями разработано несколько приближенных теорий, из которых можно выделить сеточную теорию [5] как простейшую и наиболее интересную в методологическом плане. Эта теория основана на предположении, что армирующие кордные нити нерастяжимы, а жесткостью матрицы можно пренебречь. В первую очередь сеточная теория была использована для вывода математических выражений для равновесных форм поперечного сечения и напряжений в кордах диагональных шин, нагруженных давлением.

Необходимо отметить, что сеточный подход нельзя рассматривать как структурную теорию; он является всего лишь инструментом для прикладных расчетов, поскольку совершенно не учитывает жесткость резины.

Адкинс и Ривлин [6] предложили аналитическую теорию для модели однонаправленного резино-кордного монослоя, в которой кроме допущения о нерастяжимости кордных нитей предполагается, что они имеют бесконечно малое поперечное сечение. Удлинение резиновой матрицы ограничивается только в направлении, параллельном кордным нитям. Считается, что резина несжимаема и следует кривой деформирования, полученной Муни.

Акасака [7] разработал модифицированную линейную теорию для модели композита из несоосно-армированных кордными нитями слоев резины, в которой, как и в модели Адкинса – Ривлина, предполагается нерастяжимость кордных нитей и несжимаемость резины. Он получил уравнения состояния для этого частного случая ортотропии свойств материала. Его теория дает систему простых формул для расчета упругих постоянных композита из несоосно-армированных резино-кордных монослоев через модуль упругости резины и угла наклона кордных нитей. Затем полученные результаты использовались для математического описания распределения напряжений, подобного возникающему при распространении затухающей волны. Позднее Кларк [8] осуществил анализ ортотропных постоянных упругости аналогичного композита из несоосно-армированных резино-кордных монослоев и провел экспериментальную проверку результатов. Он не учитывал межслойную сдвиговую деформацию, но в его теории слоистых пластин не ставилось условие нерастяжимости корда.

Статический и динамический анализ напряжений и деформаций в диагональных шинах проведен в работах [9–13]. Особо следует отметить результаты Тернера [14], который предложил классическую формулу для определения критической скорости появления стоячей волны, и Фиалы [15], который с помощью «модели упруго посаженного кольца» (балка на упругом основании) выполнил аналитическое исследование характеристик деформирования шин при крутых поворотах. Эти работы появились почти в одно и то же время с упомянутыми выше работами Хофферберца [5], Адкинса и Ривлина [6]. Можно считать, что осмысленные исследования в области механики шинных конструкций начались в 1955 г. Большинство аналитических и экспериментальных исследований, проведенных позднее [16–20], почти целиком посвящены диагональным шинам.

Первые исследования радиальных шин [21–23] включали аналитическое изучение формы поперечного сечения, критической скорости появления стоячей волны, вибрационных свойств и характеристик деформирования шин. Расчеты проводились на основе модели упруго посаженного кольца или модели тороидальной надутой мембранной оболочки, учитывающей контактное давление между каркасом шины и ее брекерным поясом. Кольцевая модель больше подходит для анализа радиальных шин, чем диагональных, поскольку соединение протектор – пояс в конструкции радиальной шины имеет значительную изгибную жесткость и сосредоточенную массу. Кольцевая модель обычно позволяет получить аналитические решения для ряда характеристик конструкции шины, но для нее требуется оценка различных упругих постоянных компонентов шины. Оболочечная модель широко используется для анализа напряжений и деформаций как в радиальных, так и диагональных шинах, особенно с применением ЭВМ.

Анализ напряжений и деформаций в мембранных конструкциях, изготовленных из прорезиненных тканей, проводился с помощью традиционной теории упругости ортотропного тела. Хаас [24] аналитически описал деформационные характеристики и жесткость тканых материалов, нагруженных двухосным растяжением. После этого была изучена жесткость слоя прорезиненной ткани при действии мембранных усилий и рассмотрен критерий ее потери устойчивости [25], а для тороидальной мембранной конструкции с эллиптических поперечным сечением исследован случай нагружения давлением [26]. Далее для герметичных цилиндрических мембранных конструкций под действием изгибающего и крутящего моментов анализировалось разрушение после возникновения в них волн [27–29]. Однако эти исследования проведены без учета ортотропии свойств эластичных тканых композитов.

С помощью сеточной теории Акасака и Ямагиси [30] проанализировали критерий потери устойчивости и оценили жесткость надутого мембранного цилиндра из диагональных тканей, нагруженного крутящими моментами, после образования волн. Аналитически исследованы упругое деформирование и вибрационные характеристики надувных конструкций, изготовленных из двух слоев прорезиненной ткани и адгезионно соединенных между собой, с учетом ортотропии свойств материала [31, 32]. Указанные исследования

непосредственно связаны с аэрокосмическими технологиями, а также с разработкой дирижаблей и судов на воздушной подушке. Акасака и др. [33] разработали квазиизотропную эластичную диафрагму из трехнаправленной ткани и проанализировали ее нелинейные рабочие характеристики.

2.2. Упругая ортотропия однонаправленного резинокордного монослоя и композитов на его основе

На рис. 2.1. показан однонаправленный резинокордный монослой (L – направление вдоль корда, T – поперечное направление). Постоянными упругости ортотропного материала являются модули упругости E_L и E_T , коэффициенты Пуассона ν_L и ν_T и модули сдвига G_m . Согласно соотношению Максвелла-Бетти, $E_L / E_T = \nu_L / \nu_T$; выражения для постоянных упругости двухфазного поперечно-изотропного материала через объемные доли компонентов имеют вид

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m, \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} - \frac{V_f V_m \left(\frac{\nu_m}{E_m} - \frac{\nu_f}{E_f} \right)^2}{\left(\frac{V_f}{E_m} + \frac{V_m}{E_f} \right)},$$

$$\nu_L = \nu_f V_f + \nu_m V_m, \quad \nu_T = \nu_L E_T / E_L, \quad 1 / G_{LT} = V_f / G_f + V_m / G_m,$$

где V_f – объемная доля кордных нитей, $V_m = 1 - V_f$ – объемная доля резиновой матрицы; E_f , ν_f , $G_f = E_f [2(1 + \nu_f)]$ – постоянные упругости материала корда; E_m , ν_m , $G_m = E_m [2(1 + \nu_m)]$ – постоянные упругости резины.

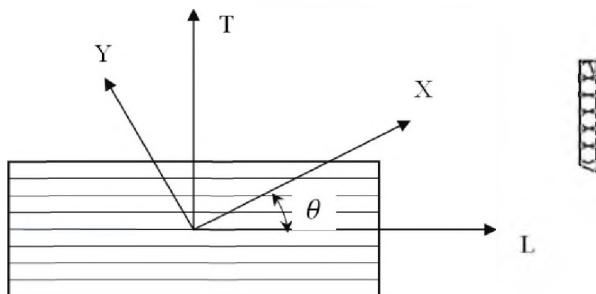


Рис. 2.1. Координатная система для композита из однонаправленных резино-кордных монослоев

Выражение для поперечного модуля упругости E_T , согласно (2.1), применимо для модели резинокордного монослоя, показанного на рис. 2.2. В ней принято, что фазы кордных нитей и резины попеременно чередуются в поперечном направлении и имеют прямоугольные поперечные сечения.

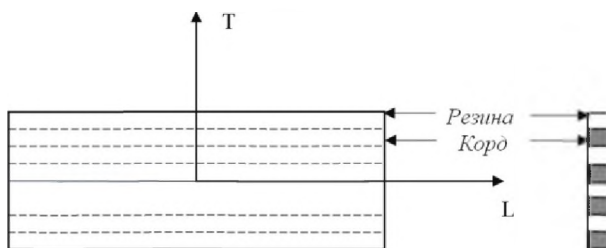


Рис. 2.2. Модель однонаправленного резино-кордного монослоя

Поскольку модуль упругости корда намного больше, чем у резины ($E_f \gg E_m$), и резина практически несжимаема, то ν_m можно положить равным 0,5, а уравнения (2.1) сводятся к следующей системе [31]

$$E_L \approx E_f V_f \square E_T, \quad E_T \approx \frac{E_m}{V_m} \frac{1}{1-v_m^2} \approx \frac{4 E_m}{3 V_m}, \quad v_T \approx 0, \quad (2.2)$$

$$G_{LT} \approx \frac{G_m}{V_m} = E_T \frac{1-v_m}{2} \approx \frac{E_T}{4}.$$

Согласно четвертому соотношению в системе уравнений (2.2), $G_{LT} \approx E_T / 4$, т.е. модуль сдвига не зависит от объемной доли кордных нитей V_f . Это соотношение представлено на рис. 2.3 сплошной линией.

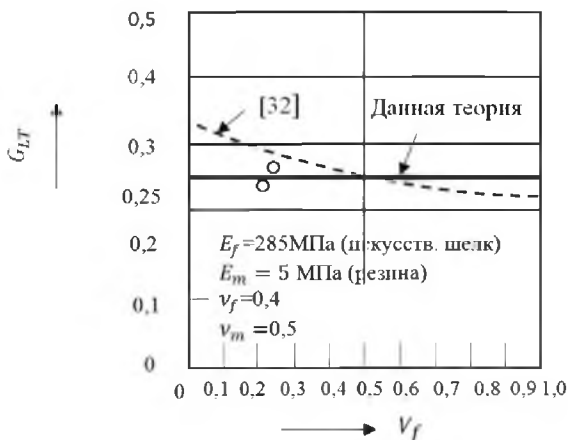


Рис. 2.3. Влияние объемной доли кордных нитей V_f на отношение модуля сдвига G_{LT} к поперечному модулю E_T для однонаправленного резинокордного монослоя

Экспериментальные точки, указанные на рисунке, получены Акасакой и др. [34]. Ранее Вальтер и др. [35] получили другую формулу, представленную штриховой кривой

$$G_{LT} / E_T = (1 + V_f) / [3(1 + 2V_f)]. \quad (2.3)$$

Справедливость уравнений (2.2) исследовалась Вальтером и Пателем [36] путем сравнения экспериментальных результатов с рассчитанными теоретически по формулам Халпина-Цая и Гафта-Тангорры. Подтверждено, что хотя уравнение (2.2) является простейшим, оно обеспечивает примерно такую же точность, как и другие формулы.

Соотношения упругости для ортотропного слоя в системе координат $x - y$, показанной на рисунке 2.4, записываются в виде

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{xy} & E_{xs} \\ E_{yx} & E_{yy} & E_{ys} \\ E_{xs} & E_{ys} & E_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}; \quad \{\sigma_x\} = [E]\varepsilon_x, \quad (2.4)$$

или

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xs} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{ys} \\ C_{xs} & C_{ys} & C_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}; \quad \{\varepsilon_x\} = [C]\sigma_x, \quad (2.5)$$

где $[E]$ и $[C]$ – матрицы соответственно жесткости и податливости, элементы которых выражены через величины $E_L, E_T, \nu_L, \nu_T, G_{LT}$ и угол θ .

Выражения для компонентов матрицы жесткости можно упростить с помощью (2.2) следующим образом [37]

$$\begin{aligned} E_{xx} &\approx E_T + E_L \cos^4 \theta, \quad E_{yy} \approx E_T + E_L \sin^4 \theta, \\ E_{ss} &\approx E_T / 4 + E_L \sin^2 \theta \cos^2 \theta, \quad E_{xy} \approx E_T / 2 + E_L \sin^2 \theta \cos^2 \theta, \\ E_{xs} &\approx -E_L \sin \theta \cos^3 \theta, \quad E_{ys} \approx -E_L \sin^3 \theta \cos \theta. \end{aligned} \quad (2.6)$$

При действии напряжения σ_x на резинокордный монослой, как показано на рис. 2.4, он удлиняется вдоль оси x , сокращается вдоль оси y и испытывает сдвиговую деформацию γ_{xy}

$$\gamma_{xy} = C_{xys} \sigma_x. \quad (2.7)$$

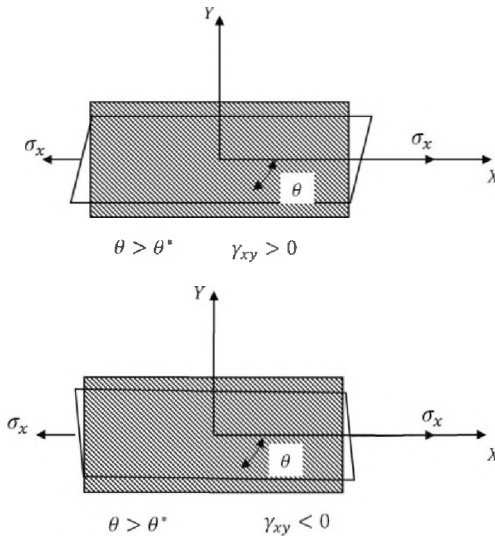


Рис. 2.4. Зависимость знака сдвиговой деформации γ_{xy} от угла армирования кордных нитей в монослое

Компоненту C_{xy} матрицы податливости $[C]$ можно значительно упростить с помощью уравнения (2.2)

$$C_{xy} = -2 \cos^2 \theta \sin \theta (1 + \nu_L) / E_L + 2 \cos \theta \sin^2 \theta (1 + \nu_T) / E_T + \sin \theta \cos \theta (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) / G_{LT} \approx \quad (2.8)$$

$$\approx 2 \sin \theta \cos^2 \theta (2 - \operatorname{tg}^2 \theta) / E_T.$$

Можно видеть, что сдвиговая поверхностная деформация равна нулю при

$$\theta^* = \operatorname{arctg} \sqrt{2} = 54,7^\circ \quad (2.9)$$

и меняет знак при переходе через значение θ^* . Такое поведение характерно для однонаправленного резинокордного монослоя и обычно несвойственно жестким композитам (например, эпоксидным стеклопластичкам).

2.3. Математическая модель тканого материала гладкого переплетения

Типичный композит характеризуется набором различных факторов, отражающих свойства исходных компонентов и технологических условий его переработки. Например, свойства корда определяются через свойства кордной нити, в число которых входит диаграмма деформирования нити, число ее сложений, крутка, размер, тип материала и равновесность. Свойства нити в свою очередь зависят от параметров волокна и т.д. Последними в этой очереди стоят тканые материалы.

При проектировании композитов, армированных тканью, приходится затрачивать значительные усилия на выбор схемы переплетения ткани, типа волокон, кордно-тканой структуры и условий переработки композита, которые могут обеспечить оптимальный комплекс свойств готового изделия. Нет необходимости повторять, что диапазон требований к эксплуатационным характеристикам каждого композита довольно широк и определяется областью и характером применения изделия.

Делались многочисленные попытки математического моделирования и проектирования структур из тканых материалов, основанные на принципах механики [33–42]. Кавабата и др. [40] описали изящный метод анализа нелинейного деформационного поведения

тканей с гладким переплетением в условиях сложного нагружения. Характерная особенность метода расчета таких тканых материалов – специально введенные условия совместности перемещений и равновесия сил в точках пересечения нитей основы и утка ткани. Эта важная особенность структуры тканей обуславливает такие явления в материале, как изменение искривленности нитей и их защемление, не учитываемых во многих подходах [41, 42].

Методология проектирования эластичных композитов, армированных тканью, должна учитывать свойства всех компонентов композита, их взаимодействие, а также параметры технологического процесса. Знание свойств материала помогает найти наилучший из возможных проектов композита, тогда как понимание роли параметров технологического процесса обеспечивает средства достижения целей проектирования с помощью необходимых коррекций на промежуточных стадиях процесса.

Аналогичную методику можно применить и для выбора исходных материалов и управляемых параметров технологического процесса получения композита, если задан комплекс свойств последнего. Такой подход, основанный на математических моделях и интерактивной вычислительной программе, был разработан и успешно использован для проектирования различных типов композитов, армированных тканью [43, 44].

Математическая модель и вычислительная программа разработаны с учетом реальных свойств волокон и всех факторов, изменение которых может повлиять на свойства готового изделия. К таким факторам относятся размер пучка нитей, крутка, уработка основы, усадка утка, геометрия переплетения, условия защемления, управляемые параметры технологического процесса и схема укладки слоев в композите. По существу, моделируются и включаются в интерактивную вычислительную программу все этапы проектирования и изготовления композита, а также учитывается влияние каждого этапа на свойства готового композита.

В настоящее время эта интерактивная вычислительная программа используется для проектирования эластичных композитов как с помощью детерминистского подхода, так и методом коррекций. Детерминистский подход заключается в строгом определении каждого шага проектирования, а затем корректировке его с учетом управляющих параметров технологического процесса таким обра-

зом, чтобы получить готовое изделие с требуемыми характеристиками. Такая процедура эффективна, если технологический процесс изготовления хорошо управляем.

Метод коррекции основан на предположении, что существуют различия между разработанным проектом и его реализацией с помощью технологического процесса, но эти различия поддаются контролю. В этом случае соответствующая коррекция в процессе изготовления позволяет получить композитное изделие с заданными свойствами.

Тканый материал состоит из большого числа повторяющихся элементов, в дальнейшем называемых ячейками ткани. Конфигурация ячейки повторяется в структуре ткани путем ее переноса и отражения. Предполагается, что все ячейки идентичны и однородно распределены по всей поверхности ткани. Поэтому для изучения деформационного поведения ткани при нагружении достаточно рассмотреть поведение типичной ячейки ткани (рис. 2.5). Ячейка ткани может состоять из двух или более жгутов, контактирующих друг с другом в ряде точек переплетения. Типичная ячейка ткани с гладким переплетением состоит только из одной основной и одной уточной нитей, контактирующих в общей точке переплетения (рис. 2.6).

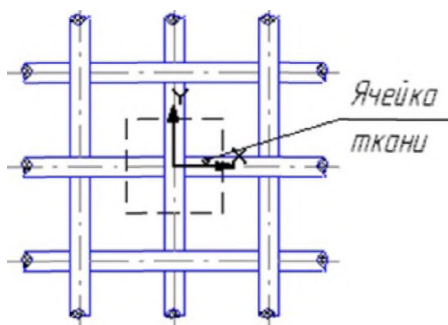


Рис. 2.5. Структурная схема ткани полотняного переплетения

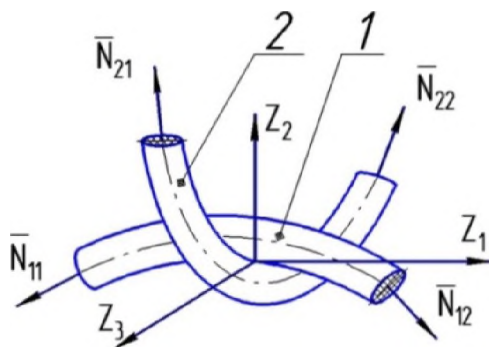


Рис. 2.6. Пространственное представление зоны контакта

Более сложные ячейки ткани имеют кратные нити в одном или более направлений. Рисунок переплетения симметричен относительно срединной плоскости ткани. Обычно форма ячейки, размер и длина искривленного участка каждого жгута – известные геометрические параметры. Для расчета деформационного поведения ячейки ткани предположим, что жгуты подобны тонким криволинейным стержням с нелинейной зависимостью между напряжениями и деформациями. Очевидно, что жгуты обладают различными жесткостями при растяжении, изгибе и кручении, причем осевая жесткость значительно превосходит остальные. Эти характеристики жесткости можно измерить на нитях или жгутах, а также получить с помощью ранее описанных моделей и использоваться в анализе. Отметим, что в предположении о тонких стержнях игнорируется размер жгутов и их плотность. Однако влияние размера нити и ее плотности можно учесть в рассматриваемой модели через условия защемления.

2.4. Перекрестно-армированные слоистые резинкордные композиты

Постоянные упругости двухслойного перекрестно-армированного резинкордного композита, модель которого показана на рис. 2.7, можно определить с помощью традиционной теории слоистых пластин, не учитывающей деформацию межслойного сдвига.

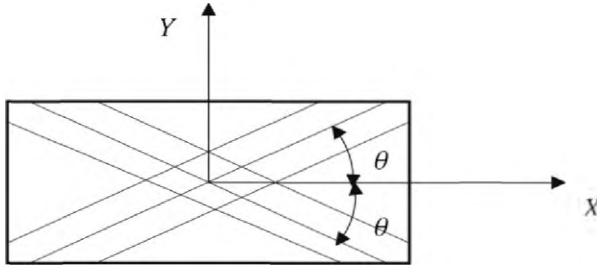


Рис. 2.7. Модель двухслойного композита с углами армирования волокон в слоях $\pm\theta$

Из уравнений напряженного состояния двух слоев, имеющих ориентацию кордных нитей под углами $\mp\theta$, получаем

$$\{\sigma_x^{(1)}\} = [E(-\theta)]\{\varepsilon_x^{(1)}\}, \quad \{\sigma_x^{(2)}\} = [E(\theta)]\{\varepsilon_x^{(2)}\}. \quad (2.10)$$

Полагая $\{\varepsilon_x^{(1)}\} = \{\varepsilon_x^{(2)}\} = \{\varepsilon_x\}$, можно написать вектор среднего напряжения $\{\sigma_x\} = \left(\{\sigma_x^{(1)}\} + \{\sigma_x^{(2)}\} \right) / 2$ в виде

$$\{\sigma_x\} = (1/2)\{[E(-\theta)] + [E(\theta)]\}\{\varepsilon_x\} = [E^*(\theta)]\{\varepsilon_x\}, \quad (2.11)$$

где $[E^*(\theta)]$ – матрица жесткости перекрестно-армированного слоистого резинокордного композита, которую можно представить как

$$[E^*(\theta)] = \begin{bmatrix} E_{xx}^* & E_{xy}^* & 0 \\ E_{xy}^* & E_{yy}^* & 0 \\ 0 & 0 & E_{ss}^* \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

В таком случае получаются следующие постоянные упругости

$$E_x = E_{xx}^* - (E_{xy}^*)^2 / E_{yy}^*, \quad E_y = E_{yy}^* - (E_{xy}^*)^2 / E_{xx}^*, \quad (2.13)$$

$$\nu_x = E_{xy}^* / E_{yy}^*, \quad \nu_y = E_{xy}^* / E_{xx}^*, \quad G_{xy} = E_{ss}^* .$$

Эти соотношения выведены Кларком [8], который проверил их экспериментально. С помощью уравнений (2.2), используя выражения (2.13), можно получить следующие формулы

$$E_x = \left[E_L E_T (\sin^4 \theta - \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \cos^4 \theta) + (3/4) E_T^2 \right] / \left(E_L \sin^4 \theta + E_T \right),$$

$$E_y = \left[E_L E_T (\sin^4 \theta - \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \cos^4 \theta) + (3/4) E_T^2 \right] / \left(E_L \cos^4 \theta + E_T \right),$$

$$\nu_x = \frac{E_L \sin^2 \theta \cos^2 \theta + (1/2) E_T}{E_L \sin^4 \theta + E_T} \quad (2.14)$$

$$\nu_y = \frac{E_L \sin^2 \theta \cos^2 \theta + (1/2) E_T}{E_L \cos^4 \theta + E_T}$$

$$G_{xy} = E_L \sin^2 \theta \cos^2 \theta + (1/4) E_T \cos^2 2\theta ,$$

причем, считается справедливым соотношение Максвелла-Бетти

$$E_x / E_y = \nu_x / \nu_y .$$

На рис. 2.8, 2.9 и 2.10 показаны зависимости, соответственно, E_x , G_{xy} и ν_x от угла армирования θ для материала с = 1440 МПа

и $E_T = 6,9$ МПа. Штриховыми линиями на этих рисунках представлены теоретические результаты, кружками – экспериментальные; и те и другие получены Кларком [8]. Сплошные линии построены по уравнениям (2.14); можно видеть, что они близки к кривым, построенным по более точным формулам (2.13).

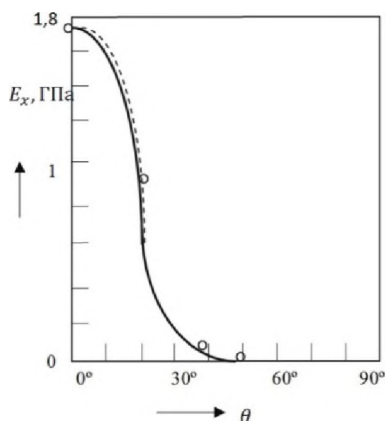


Рис. 2.8. Влияние угла наклона кордных нитей на модуль Юнга двухслойного композита [8]

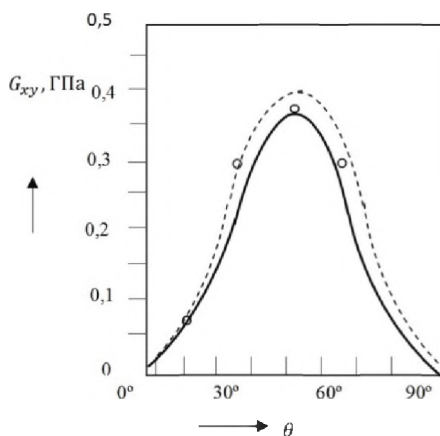


Рис. 2.9. Влияние угла наклона кордных нитей на модуль сдвига G_{xy} двухслойного композита [8]

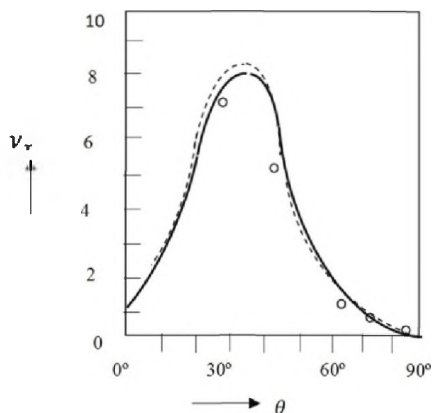


Рис. 2.10. Влияние угла наклона кордных нитей на коэффициент Пуассона ν_x двухслойного композита [8]

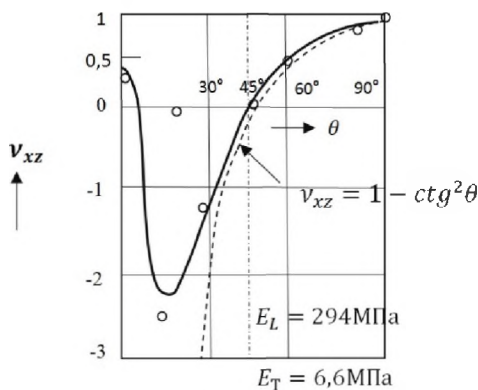


Рис. 2.11. Влияние угла наклона кордных нитей на коэффициент Пуассона ν_x двухслойного композита

Когда такая слоистая пластина, как на рис. 2.7 растягивается в направлении x , она утолщается, если угол укладки армирующих волокон в монослоях меньше 45° . Этот факт, известный из опыта, указывает на то, что коэффициент Пуассона ν_{xz} в направлении

толщины пластины меньше нуля при малых углах армирования. Поскольку деформирование слоистого резинокордного композита вызывает пантографическое изменение угла укладки кордных нитей, они удлиняются мало, тогда как резиновая матрица деформируется значительно. Однако резина практически несжимаема, а кордные нити вследствие высокого модуля упругости испытывают малое изменение объема, поэтому кордно-резиновый композит почти несжимаем. Поскольку математически требование несжимаемости в случае малых деформаций задается соотношением $\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0$, получаем

$$v_{xz} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = 1 + \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = 1 - v_x \quad (2.15)$$

С использованием (2.14) уравнение (2.15) записывается в виде [35]

$$v_{xz} = 1 - \frac{\left(E_L \sin^2 \theta \cos^2 \theta + E_T \right)}{\left(E_L \sin^4 \theta + E_T \right)} \approx 1 - \operatorname{ctg}^2 \theta \quad (2.16)$$

На рис. 2.11 показаны теоретические зависимости v_{xz} от угла наклона армирующих волокон для слоистого перекрестно-армированного композита с указанными модулями упругости. Сплошная кривая – точное решение (2.16), штриховая – приближенное, кружки – экспериментальные результаты. В обоих случаях v_{xz} при $\theta = 45^\circ$ равно нулю и имеет минимум при $\theta = 20^\circ$. При отрицательных значениях v_{xz} межслойное напряжение стремится отделить слои друг от друга.

2.5. Слоистый резинокордный композит с промежуточным резиновым слоем

В данном разделе приведены основные уравнения механики резинокордного композита, имеющего промежуточный резиновый слой между двумя несоосно-армированными слоями. Резиновый

слой считается настолько тонким, что его вклад в жесткость композита при растяжении незначителен, однако он влияет на межслойную сдвиговую жесткость.

Следуя обозначениями рисунка 1.12, уравнения равновесия для каждого композитного слоя ($i=1,2$) можно записать следующим образом

$$\frac{\partial N_x^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}^{(i)}}{\partial y} = (-1)^i p_x, \quad \frac{\partial N_{xy}^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial N_y^{(i)}}{\partial y} = (-1)^i p_y,$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (Q_x^{(1)} + Q_x^{(2)} + \bar{Q}_x) + \frac{\partial}{\partial x} (Q_y^{(1)} + Q_y^{(2)} + \bar{Q}_y) = q, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial M_x^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}^{(i)}}{\partial y} = Q_x^{(i)} + p_x \frac{h}{2}, \quad \frac{\partial M_{xy}^{(i)}}{\partial x} + \frac{\partial M_y^{(i)}}{\partial y} = Q_y^{(i)} + p_y \frac{h}{2},$$

$$\bar{Q}_x = -p_x \bar{h}, \quad \bar{Q}_y = -p_y \bar{h},$$

где p_x и p_y – межслойные касательные усилия в направлениях x и y ; h – толщина каждого слоя; \bar{h} – толщина промежуточного резинового слоя.

Три мембранных усилия и три результирующих момента, обозначенные посредством соответственно M и N , определяются как

$$\left(N_x^{(i)}, N_y^{(i)}, N_{xy}^{(i)} \right) = \int_{-h/2}^{h/2} \left(\sigma_x^{(i)}, \sigma_y^{(i)}, \tau_{xy}^{(i)} \right) dz^{(i)},$$

$$\left(M_x^{(i)}, M_y^{(i)}, M_{xy}^{(i)} \right) = - \int_{-h/2}^{h/2} \left(\sigma_x^{(i)}, \sigma_y^{(i)}, \tau_{xy}^{(i)} \right) z^{(i)} dz^{(i)}. \quad (2.18)$$

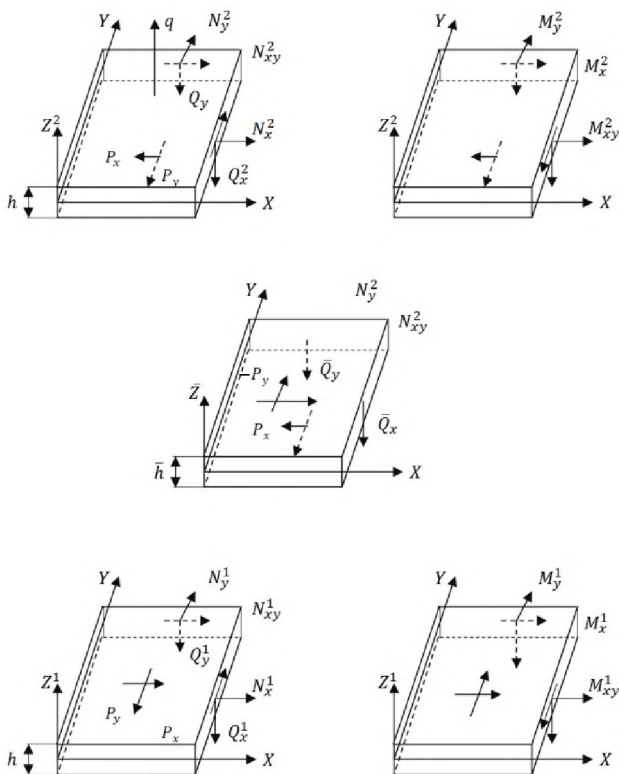


Рис. 2.12. Усилия и моменты в слоистом резинокордном композите, состоящем из двух несоосно-армированных слоев и промежуточного резинового слоя

Соотношения упругости для каждого слоя, выраженные через компоненты перемещения $u^{(i)}$, $v^{(i)}$ и w в направлениях x , y и z соответственно, задаются следующим образом

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x^{(i)} \\ \sigma_y^{(i)} \\ \tau_{xy}^{(i)} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{ccc} E_{xx}^{(i)} & E_{xy}^{(i)} & E_{xs}^{(i)} \\ E_{xy}^{(i)} & E_{yy}^{(i)} & E_{ys}^{(i)} \\ E_{xs}^{(i)} & E_{ys}^{(i)} & E_{ss}^{(i)} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} u_{,x}^{(i)} - z^{(i)} w_{,xx} \\ u_{,y}^{(i)} - z^{(i)} w_{,yy} \\ u_{,y}^{(i)} + v_{,x}^{(i)} - 2z^{(i)} w_{,xy} \end{array} \right\} \quad (2.19)$$

Здесь принятые обозначения $u'_{,x}^{(i)}$, $w_{,xx}$ следует понимать как дифференцирование, например,

$$u'_{,x}^{(i)} = \frac{\partial}{\partial x} u^{(i)}, \quad w_{,xx} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} w.$$

Межслойные касательные усилия связаны с перемещениями слоев и модулем сдвига резинового слоя G_m

$$\begin{aligned} p_x &= G_m \Psi_x = \left(G_m \Psi_x / \bar{h} \right) \left(u^{(2)} - u^{(1)} + H w_{,x} \right), \\ p_y &= G_m \Psi_y = \left(G_m \Psi_y / \bar{h} \right) \left(v^{(2)} - v^{(1)} + H w_{,y} \right), \end{aligned} \quad (2.20)$$

где $H = h + \bar{h}$; Ψ_x и Ψ_y – межслойные сдвиговые деформации (рис. 2.13).

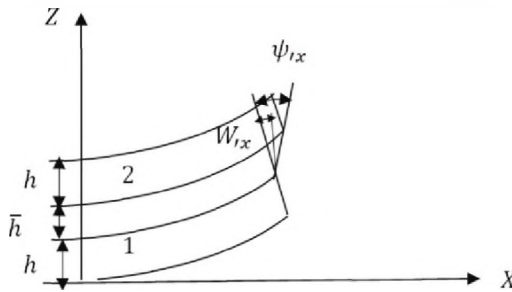


Рис. 2.13. Сдвиговая деформация Ψ_x промежуточного резинового слоя, расположенного между двумя несоосно-армированными резинокордными монослоями

В таком случае можно получить следующие дифференциальные уравнения в компонентах трех перемещений

$$\begin{aligned}
& \left[A_{xx}^{(i)} u_{,xx}^{(i)} + 2A_{xs}^{(i)} u_{,xy}^{(i)} + A_{ss}^{(i)} u_{,yy}^{(i)} \right] + \left\{ A_{xs}^{(i)} v_{,xx}^{(i)} + \left(A_{xy}^{(i)} + A_{ss}^{(i)} \right) v_{,xy}^{(i)} + \right. \\
& \left. + A_{ys}^{(i)} v_{,yy}^{(i)} \right\} = (-1)^i k \left(u^{(2)} - u^{(1)} + H w_{,x} \right), \\
& \left[A_{xs}^{(i)} u_{,xx}^{(i)} + \left(A_{xs}^{(i)} + A_{ss}^{(i)} \right) u_{,xs}^{(i)} + A_{ys}^{(i)} u_{,yy}^{(i)} \right] + \\
& + \left\{ A_{ss}^{(i)} v_{,xx}^{(i)} + 2A_{xs}^{(i)} u_{,xy}^{(i)} + A_{yy}^{(i)} v_{,yy}^{(i)} \right\} = \\
& = (-1)^i k \left(v^{(2)} - v^{(1)} + H w_{,y} \right),
\end{aligned} \tag{2.21}$$

$$\begin{aligned}
& D_{xx} w_{,xxxx} + 4D_{xs} w_{,xxxxy} + 2(D_{xy} + 2D_{ss}) w_{,xxxyy} + 4D_{ys} w_{,xyyyy} + \\
& + \\
& D_{yy} w_{,yyyyy} - kH \left\{ u_{,x}^{(2)} - u_{,x}^{(1)} + v_{,y}^{(2)} - v_{,y}^{(1)} + H(w_{,xx} + w_{,yy}) \right\} = q
\end{aligned} \tag{2.22}$$

$$k = G_m / \bar{h}, \quad A_{\alpha\beta}^{(i)} = h E_{\alpha\beta}^{(i)}, \quad D_{\alpha\beta} = \frac{h^3}{12} \sum_{i=1}^2 E_{\alpha\beta}^{(i)} \quad (\alpha, \beta = x, y, s).$$

Достаточно сложная система уравнений, полученная с помощью сеточной теории, решается как часть комплексной вычислительной программы, с помощью которой успешно рассчитывается нелинейная кривая деформирования тканого материала Акасака [7]. Кривые, рассчитанные с помощью вычислительной программы, хорошо согласуются с экспериментальными результатами на начальной стадии нагружения. Для больших нагрузок данные о сходимости результатов теоретических исследований с практическими отсутствуют. Имеются и другие модели исследований, например, геометрическая модель, неупругая модель, разработанная Стаббзом [45] и модель, разработанная Моф на основе принципа виртуальной работы [43, 44]. Все модели предполагают двусное растяжение и поворот семейств нитей друг относительно друга. Учет сдвига ни-

тей в узлах переплетения отсутствует. Однако сила трения возникает при больших деформациях. На этом основании предложенные теории невозможно применить, например, к расчету напряженно-деформированного состояния в материале препрега при проколе отверстия заостренным стержнем, к расчету изгиба цилиндрической оболочки в состоянии препрега, к расчету возможности укладки образцов ткани на выпуклые поверхности и т.д. В этих случаях без учета сил трения не обойтись, так как везде имеет место конечная деформация сдвига.

2.6. Неупругое состояние тканей гладкого переплетения

Неупругость ткани может проявиться в силу ряда причин, включающих: 1) неупругое состояние материала матрицы (элементарные нити в составе комплексной нити недоуплотнены); 2) диссипацию энергии из-за трения между волокнами и нитями; 3) проскальзывание нитей в точке их переплетения; 4) расслоение и проскальзывание по границе раздела нить – матрица. Неупругость матрицы и эффективные нелинейные свойства нитей можно моделировать непосредственно, задавая соответствующие свойства материала для нитей. Поскольку структурный элемент ткани рассматривается здесь как пространственная ферма, состоящая из нитей без физической связи в месте их пересечения, то предусматривается их проскальзывание. Сопротивлением такому проскальзыванию становятся силы трения. В момент проскальзывания они достигают максимального значения, остаются такими же после остановки движения и установления равновесия. Таким образом, при рассмотрении условий равновесия нитей структурного элемента эти силы должны учитываться.

В результате неупругость, обусловленную причинами, отличными от диссипации энергии деформирования в точках пересечения нитей, можно рассматривать в рамках выбранного структурного элемента. С целью упрощения изучаемой проблемы игнорируется любая нелинейность свойств нитей, а неупругость матрицы и неупругость, вызванная расслоением по границе раздела нить – матрица, моделируется с помощью линейно-упругой работы процесса упрочнения. Такой материал характеризуется начальной неупругой деформацией, а в дальнейшем – упругой. Поскольку нелинейность

материала связана с неупругим поведением только нитей, характеризующихся в дискретной модели матрицы, смоделируем эти неупругие перемещения как мгновенные деформации при условии приложения внешней нагрузки. Экспериментальные исследования показали справедливость такого утверждения: совсем небольшая нагрузка способствует завершению стадии неупругих деформаций. Это экспериментально установлено в условиях растяжения и в условиях сжатия тканого материала в состоянии препрега.

К решению задачи можно подходить с разных точек зрения. Например, структурный элемент можно рассматривать как форму с упругопластическими элементами, для которой решается упругопластическая задача с подходящей функцией нагружения для линейно упрочняющегося материала матрицы. Однако в дальнейшей теории используется более простой метод описания поведения структурного элемента ткани, подверженного заданному нагружению: 1) нагрузка и деформация в материале в любой заданный момент нагружения рассматривается в качестве предварительного напряжения и предварительной деформации; 2) эквивалентные механические и геометрические характеристики модели материала подгоняются под достигнутые значения предварительного напряжения и деформации; 3) записываются новые уравнения, определяющие поведение материала при нагружении и разгрузке (силы трения при нагружении и разгрузке имеют противоположное направления действия); 4) соответствующие уравнения решаются для известных приращений нагрузки двусосного напряженного состояния; 5) результирующие напряжения и деформации вычисляются суммированием предварительных напряжений и деформаций с их приращениями.

В результате, зная форму и размер ячейки, необходимо решить систему уравнений для каждой ячейки ткани в рамках следующих ограничений совместности: 1) у параллельных жгутов перемещения концов должны быть одинаковыми; 2) в зонах контакта любого жгута напряжения и перемещения должны быть непрерывными, пока эти контакты сохранялись; 3) должны удовлетворяться установленные для ячейки граничные условия.

2.7. Многоволоконные нити и их влияние на строение ткани

Необходимо отметить, что тканые материалы создаются из нитей и первоначально обладают высокой гибкостью. Существуют две причины этой гибкости: 1) гибкость самой нити, состоящей из тонких параллельных волокон, движение которых ограничивается только трением между ними при деформировании, 2) структура ткани создается путем переплетения нитей без жесткой связи в местах переплетения. Это означает, что перемещение отдельных нитей или волокон в структуре, вызванное усилиями, приложенными к ткани, имеют свойства, аналогичные свойствам тела с подвижной структурой [46].

При определении параметров строения тканей необходимо принять форму поперечного сечения нитей. Здесь название «нити» относится к отдельным волокнам, пучкам некрученных волокон, пучкам волокон с малой круткой и ровингам. В реальности поперечные сечения нитей имеют неправильную форму. Для расчетов исследователи принимают следующие формы поперечных сечений [47–50]:

- в виде круга (характерно для хлопчатобумажной, льняной, шерстяной тканей);
- в виде эллипса (характерно для химических нитей в тканях);
- в виде овала, «стадиона» и другие формы.

В дальнейшем будут рассматриваться многоволоконные стеклянные нити, из которых формируются ткани простого переплетения (полотняное, сатиновое и атласное). Сечения нитей у таких тканей имеют форму луночки.

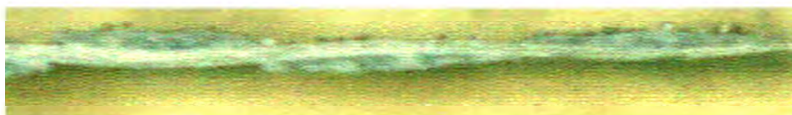
На рис. 2.14, *а*) представлена фотография уточного сечения ткани Т-13, выполненной из слабо крученой стеклянной нити. На рис. 2.14, *б*) представлена фотография уточного сечения ткани ТР - 0,7 – 80, выполненной из ровинга.

Как видно из рисунков, поперечное сечение нитей сильно сплющено. Степень сплющивания нитей в ткани зависит в основном от того, насколько свободно скрещенные волокна нитей могут скользить относительно друг друга. Скольжение облегчено у нитей без крутки, у слабо крученных нитей и у ровингов и затруднено у нитей с высокой степенью крутки. Отметим, что сплющивание по-

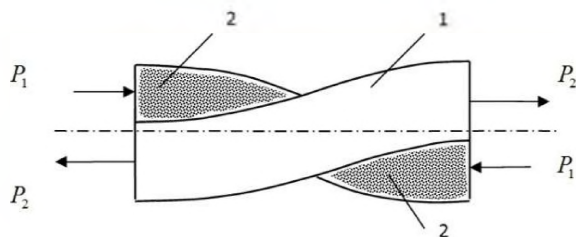
перечного сечения нитей играет важную роль, определяя геометрию препрегов, выполненных на основе тканых материалов, и отражается на способности препрегов допускать сдвиговые деформации со смещением. Кроме того, и это весьма существенно, форма сечения луночки и ее значительная расплюснутость позволяют утверждать, что угол α (рис. 2.15) у нитей тканей простого переплетения достаточно мал и составляет не более 0,02. Предположим, что луночка ограничена двумя дугами окружностей одного радиуса, как показано на рис. 2.15.



а)



б)



в)

Рис. 2.14. Поперечные сечения стеклотканей гладкого переплетения и схема структурного элемента ткани:
 1 – продольная нить основы; 2 – поперечная нить утка;
 P_1, P_2 – внутренние усилия

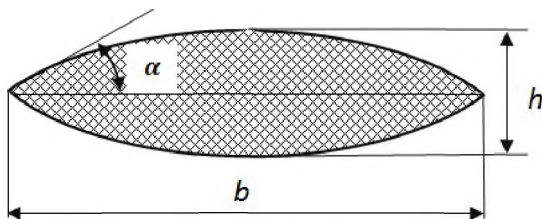


Рис. 2.15. Поперечное сечение многоволоконной нити

Обозначим через R – радиус дуги окружности, очерчивающей сечение нити. Тогда между параметрами R, α и h имеют место простые геометрические зависимости

$$b = 2R \sin \alpha, \quad h = 2R(1 - \cos \alpha),$$

$$S = R^2 (2\alpha - \sin 2\alpha).$$

Здесь S – площадь сечения луночки.

С учетом того, что для рассматриваемых тканей угол α мал, предыдущие зависимости можно упростить. В результате чего получим

$$b = 2R\alpha, \quad h = R\alpha^2, \quad S = \frac{4}{3}R^2\alpha^3. \quad (2.23)$$

В технических условиях на конструкционные ткани указывается количество нитей, расположенных в полосе ткани шириной единица, как для направления основы, так и для утка. Пусть эта величина будет равной m . Тогда, очевидно, имеет место равенство

$$b_0 = 1 / m.$$

Здесь индекс «0» относится к ткани в состоянии после ткачества.

Отметим, что вся площадь луночки заполнена сечениями элементарных волокон, поэтому можно положить

$$S_0 = \gamma \sum_{i=1}^n \delta_i^2 n_i = \gamma S_{01} ,$$

где n_i и δ_i - количество и диаметр i - ой элементарной нити, находящейся в составе комплексной нити; n - число, определяющее ассортимент элементарных нитей в составе комплексной нити; γ - плотность упаковки комплексной нити элементарными нитями ($\gamma=1$, если элементарные нити упакованы так, что центры их сечений на плоскости занимают вершины квадратов со стороной d_i ; $\gamma = \sqrt{3}/2$, если их центры занимают вершины равносторонних треугольников со стороной d_i).

Подставим предыдущие равенства в соотношения (2.23), в результате получим

$$\alpha_0 = 3\gamma m^2 S_{01}, \quad R_0 = \frac{1}{6\gamma m^3 S_{01}}, \quad h_0 = \frac{3}{2} \gamma m S_{01}. \quad (2.24)$$

При нагружении препрега нагрузками, лежащими в плоскости ткани, происходит изменение сечения нитей, точнее, размеров луночки. Пусть вместо α_0 этот размер станет равным α . Тогда с учетом того, что площадь сечения луночки практически не изменяется при деформировании нитей, остальные размеры луночки будут равны

$$R = \sqrt{\frac{3\gamma S_{01}}{4\alpha^3}}, \quad b = \sqrt{\frac{3\gamma S_{01}}{\alpha}}, \quad h = \frac{1}{2} \sqrt{3\gamma S_{01} \alpha}. \quad (2.25)$$

В частности, процесс прокалывания отверстий сопровождается возникновением растягивающих напряжений в нитях, усилий сжа-

тия нитей в поперечном направлении, взаимным смещением нитей одного семейства по нитям второго семейства. При этом в плоскости их соприкосновения возникает сила сопротивления их относительному скольжению, т.е. сила трения скольжения. Величина этой силы, конечно, зависит от многих факторов, основными из которых являются: способ переплетения семейств нитей, вязкость связующего, а, следовательно, температура КМ, давление внутри слоев пакета. Сила трения скольжения между семействами нитей может принимать любые значения от нуля до значения τ_{np} , называемого предельной силой трения скольжения. Следует подчеркнуть, что значение силы трения скольжения при покое определяется неравенством

$$\tau < \tau_{np}$$

и, следовательно, это значение может быть любым, но не больше, чем τ_{np} . Величина силы трения будет равна τ_{np} лишь тогда, когда действующая на нить сдвигающая сила достигает такого значения, что при малейшем ее увеличении нити начинают двигаться (скользить).

Определим предпосылки понятия плоского напряженного состояния препрегов. Заметим, что для препрегов это понятие несколько иное. Во-первых, препреги, для которых выводится настоящая теория, представляют собой плоскую систему в виде одинаково повторяющихся слоев ткани. Во-вторых, нагружение таких препрегов осуществляется нагрузками, лежащими в нейтральных плоскостях ткани. При этом каждый слой ткани нагружается одинаково. Однако, даже при соблюдении этих условий у одного слоя ткани каждое семейство нитей деформируется по-разному, поэтому определение плоского напряженного состояния, как это трактуется в обычном смысле, к слою ткани неприемлемо. Здесь идея плоского напряженного состояния заключается в том, что слои ткани не должны мешать друг другу при их деформировании. В таком случае при рассмотрении напряженно-деформированного состояния препрегов можно обойтись рассмотрением одного слоя ткани. Этому способствует практическая неизменяемость толщины слоя ткани при деформировании.

Отсутствие сдвигающих напряжений между волокнами в нитях компенсируется изгибом нитей и деформацией их формы сечения. По этой причине равнодействующая всех сил любого сечения ткани, перпендикулярного к нейтральной плоскости, лежит в этой же плоскости. Такое поведение характерно для абсолютно гибких нитей. Для примера рассмотрим элемент ткани в виде структурной ячейки. Он обладает центральной симметрией (рис. 2.14, в).

На рисунке утраченные связи заменены силами. Здесь продольная нить растягивается, а поперечные нити сжимаются. Нормальные сечения нити основы перпендикулярны к нейтральной плоскости ткани. Пусть равнодействующие сил каждого сечения не лежат в нейтральной плоскости, тогда они не лежат и на одной прямой. Их точки приложения расположены симметрично относительно общего центра симметрии. В этом случае вырезанный элемент не будет находиться в равновесии, так как момент всех сил не равен нулю. Полученное противоречие отвергает сделанное предположение.

Покажем теперь, что в любом сечении структурной ячейки ткани равнодействующая внутренних сил лежит в нейтральной плоскости. Для этого рассмотрим элемент ткани, у которого с одной стороны сечение проведено по краю ячейки, а с другой стороны сечение проходит внутри самой ячейки. Такой элемент должен находиться в равновесии. Равнодействующая всех сил в первом сечении, как установлено выше, лежит в нейтральной плоскости. Таким образом, для обеспечения условий равновесия вырезанного элемента необходимо и достаточно, чтобы равнодействующая всех сил для второго сечения была равна по модулю с равнодействующей первого сечения, лежала на одной с ней прямой и имела противоположное направление. Это означает, что равнодействующая всех сил для любого сечения ткани лежит в нейтральной плоскости ткани.

В этом случае отсутствуют перемещения лежащих в нейтральной плоскости точек ткани в направлении толщины ткани. Следует также добавить, что нейтральная плоскость всегда делит пополам толщину ткани.

Возможность приведения внутренних сил к равнодействующей, лежащей в нейтральной плоскости, позволяет принять для препрегов модель плоского напряженного состояния. На этом основании может быть введено среднее значение напряжений по толщине ткани.

2.8. Зависимость между напряжениями и деформациями при растяжении тканого материала препрега

Предметом дальнейших исследований являются препреги, которые представляют собой многослойную композицию из тканого материала и полимерного связующего. Ткани простого (гладкого) переплетения выработаны из многоволоконной стеклянной нити. Связующее находится в состоянии наименьшей вязкости, например, в разогретом состоянии до температуры 80 °С. Для того, чтобы перейти к дальнейшим исследованиям, сделаем одно важное допущение: нити в тканых препрегах являются абсолютно гибкими. Это означает, что они обладают следующими свойствами [51–54]: нити работают только на растяжение (отсутствие изгибной жесткости приводит к потере устойчивости при появлении сжимающих усилий в направлении по касательной к нити); усилие, растягивающее нить, всегда направлено по касательной к нитям (вытекает из условия равенства нулю изгибающего момента в любом сечении нити).

В работе японских авторов [55] для описания зависимости между нагрузкой и деформацией у тканых материалов при двухосном растяжении использовалась зависимость, подобная обобщенному закону Гука

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= s_{11}\sigma_{11} + s_{12}\sigma_{22}, \\ \varepsilon_{22} &= s_{21}\sigma_{11} + s_{22}\sigma_{22},\end{aligned}\tag{2.26}$$

где s_{ij} - некоторые постоянные [55].

Однако указанные формулы применимы только при малой деформации, т.е. когда растягивающая деформация составляет не более 20% от разрывной. Постоянные упругости s_{ij} ($i, j = 1, 2$) определяются на основе экспериментов при двухосном растяжении образцов-полосок.

Зависимости (2.26) дают значительную ошибку при больших деформациях. Поэтому они неприемлемы, если их использовать, например, при построении теории расчета напряженно деформиро-

ванного состояния материала в окрестности прокалываемых отверстий. Такими зависимостями могут быть

$$\varepsilon_{11} = s_{11}\sigma_{11} + s_{12}\sigma_{22} + \gamma_{11}, \quad (2.27)$$

$$\varepsilon_{22} = s_{21}\sigma_{11} + s_{22}\sigma_{22} + \gamma_{22},$$

где γ_{11}, γ_{22} – коэффициенты, описывающие необратимые деформации при растяжении ткани в направлении основы и утка.

Как показали многочисленные испытания [56, 57], зависимости (2.27) наиболее точно описывают связь между нагрузкой и деформациями в области предельных деформаций. Экспериментально показано, что для тканей гладкого переплетения (полотняного, сатинового и саржевого плетений) коэффициенты s_{12} и s_{21} можно положить равными нулю. В этом случае

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_{11}} + \gamma_{11}, \quad (2.28)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E_{22}} + \gamma_{22}.$$

где ε_{11} – относительная деформация ткани при растяжении в направлении основы; σ_{11} – напряжения растяжения ткани в направлении основы; E_{11} – модуль упругости при растяжении ткани в направлении основы; ε_{22} – относительная деформация при растяжении в направлении утка; σ_{22} – напряжение растяжения в направлении утка; E_{22} – модуль упругости при растяжении в направлении утка. Необходимо также отметить, что во всех случаях нагружения препрегов компоненты деформаций ε_{11} , ε_{22} и компоненты напряжений σ_{11} , σ_{22} неотрицательны, исходя из абсолютной гибкости нитей.

При подтверждении зависимостей (2.28) путем испытаний полоса ткани нагружалась поперечными растягивающими нагрузками. Затем одновременно производилось нагружение этой же полосы в продольном направлении. Такие испытания проводились на семи видах тканей гладкого переплетения. Оказалось, что на всем диапазоне нагружения продольными нагрузками при постоянной нагрузке в поперечном направлении не наблюдалось деформации в поперечном направлении. Из этого был сделан вывод, что для тканей гладкого переплетения из многоволоконных нитей справедливы зависимости (2.28). Однако к ним можно придти и путем логических рассуждений. Действительно, рассматривая закон (2.27), предположим, что напряжения σ_{11} постоянны, а напряжения σ_{22} изменяются в сторону увеличения. В результате нити семейства «2» распрямляются, а нити семейства «1» из-за переплетения их с нитями семейства «2», наоборот, искривляются еще больше. Учитывая постоянство напряжений σ_{11} , отметим, что удлинение ε_{11} должно в таком случае уменьшаться при увеличении значений σ_{22} . На этом основании заключаем, что $s_{12} \leq 0$. По той же причине выполняется и условие $s_{21} \leq 0$. С другой стороны, при распрямлении нитей одного семейства в местах контакта с другим семейством возникает сдвиг (это характерно для тканей гладкого переплетения), который приводит к возникновению касательных напряжений. А увеличение амплитуды изгиба у другого семейства нитей приводит к изменению формы сечения у первого семейства, точнее, после появления касательных напряжений создаются условия, при которых происходит сжатие сечения. При этом на первой стадии имеет место неупругое сжатие, когда комплексная нить доуплотняется. Дальнейшее уплотнение является упругим и поэтому оно несущественно мало, так как усилия сжатия сечения нитей в этом случае малы и недостаточны для заметного изменения формы сечения. Другими словами, существует нижний предел распрямления нитей в ткани при их растяжении. Следовательно, когда наступает вторая стадия сжатия, нити первого семейства перестают распрямляться и поэтому дальнейшее увеличение усилий растяжения в них не приводит к уменьшению компоненты ε_{11} . К сказанному следует добавить, что первая стадия сжатия заканчивается еще при относительно малых

усилиях растяжения в нитях. Все это в совокупности приводит к выводу, что для тканей гладкого переплетения, выполненных из многоволоконных нитей, должно быть

$$s_{12} = s_{21} = 0.$$

Таким образом для тканей гладкого переплетения зависимости (2.27) могут быть представлены в виде (2.28).

При проведении испытаний образца ткани размером 25x100 мм² минимальная нагрузка была принята равной 300 Н. Уменьшать это значение не имело смысла, так как при малых нагрузках на результат измерения деформаций сказываются некоторые неустраняемые, сопутствующие методике проведения испытаний ограничения (усадочные явления образца на границах его закрепления, перекос образца при закреплении в зажимах и т.п.). Однако эти ограничения самоустраиваются и перестают влиять на результаты измерений после нагружения образцов нагрузкой более 10% от предельной. Исходя из этого, начальная нагрузка на образец была принята равной 300 Н. Максимальная нагрузка при испытаниях по тем же причинам была выбрана равной 75% от максимально возможной. Разброс результатов испытаний составил не более 12%, а среднее квадратическое отклонение на всем диапазоне испытаний по величине не превосходило 7% от математического ожидания. Такие результаты испытаний являются вполне приемлемыми для тканых материалов. Необходимо также отметить, что выбранный диапазон нагружения можно было бы расширить в обе стороны, если бы были устранены все сопутствующие испытаниям ограничения. Дело в том, что (это установлено другими исследователями) стеклянная нить не имеет промежутков упрочнения материала и в ней практически отсутствует диапазон текучести. Следовательно, деформация также линейна и при нагрузке близкой к максимально возможной.

На начальной стадии нагружения зависимость между нагрузкой и деформацией может быть нелинейной. Мы не знаем, какой в точности закон здесь действует. Тем не менее, необходимо было доопределить зависимости на начальном участке, что и было сделано в форме 2.26, описанной авторами [55]. Однако, следует принять внимание, что после снятия нагрузки остаточные деформации не

равны нулю. Таким образом, принятые линейные зависимости обеспечивают решение задачи с достаточной степенью точности в области упругих деформаций.

Модель, представляемую зависимостью (2.25), можно описать следующим образом [58]. Если идеальный упругий элемент может быть представлен как пружина (рис. 2.16, а), то рассматриваемая модель представляется в виде двух пружин, последовательно соединенных между собой (рис. 2.16, б).

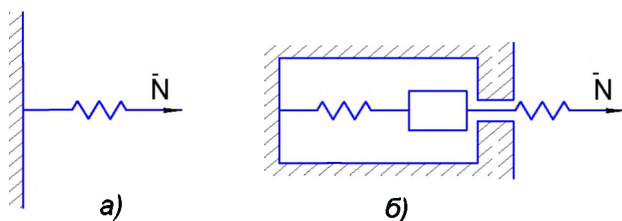


Рис. 2.16. Механические модели упругих сред

Процесс растяжения этого материала делится на две стадии. Первая стадия соответствует области изгиба и растяжения, когда искривленная нить выпрямляется и одновременно растягивается, вторая стадия – область после изгиба, когда выпрямленная нить только растягивается. Экспериментально установлено, что после снятия внешней нагрузки при растяжении образцов имеет место существование остаточных деформаций. Практически они равны γ_{11} и γ_{22} для соответствующих семейств нитей. Эта необратимость имеет место на начальной стадии нагружения и действует до тех пор, пока практически не выпрямится изогнутая при формовании ткани нить. Стекланные ткани имеют в этом смысле большое преимущество, так как сплюснутость нитей в форме луночки позволяет сильно снизить их изогнутость в ткани. Изогнутость характеризуется углом α (рис. 2.14). У стекланных тканей этот угол по величине не более 1° . У других тканей, у которых сечение нитей имеет форму близкую к кругу, величина угла α может быть 30° и более. Очевидно, что изогнутость нити является главной причиной необратимости деформации, однако существуют и второстепенные: 1) диссипация энергии из-за трения между волокнами; 2) проскаль-

зывание нитей в точках их переплетения [45]. Наиболее точное поведение ткани при растяжении соответствует зависимости, представленной на графике рис. 2.17.

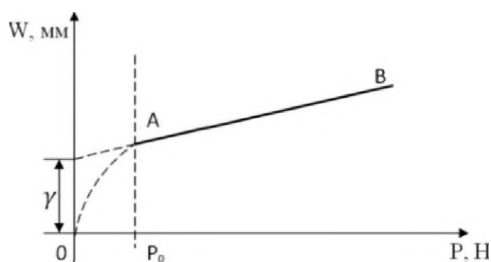


Рис. 2.17. Диаграмма напряженно-деформированного состояния ткани при растяжении

При $0 < P < P_0$ деформация ткани осуществляется, в основном, за счет распрямления нитей, а при $P > P_0$ — только за счет упругой деформации нитей ткани. W — удлинение ткани под действием нагрузки P ; γ — величина равная γ_{11} или γ_{22} в зависимости от направления испытания образца ткани.

Для стеклотканей, применяемых в полимерных композициях, необратимая составляющая деформации мала, составляет не более 4 %, однако пренебрегать ею нельзя, так как при деформации препрегов такое пренебрежение может привести к значительной погрешности в определении напряженно-деформированного состояния (максимальная относительная деформация стеклонитей составляет около 2 %). Кроме того, необратимая составляющая деформации — это тот резерв или часть его, который позволяет провести местное объемное уплотнение материала препрега в районе деформации, например, при проколе отверстия.

2.9. Установление закономерностей поведения тканей при сжатии

Рассматриваются тканые материалы, образованные переплетением двух систем нитей под углом 90° . Большинство тканей, применяемых в настоящее время для изготовления композитов, имеют

простые схемы переплетения, такие, как полотняное, рогожное, саржевое и атласное. Из них текстильные композиты явно превосходят многие материалы по показателям удельной прочности и жесткости. С учетом сказанного возможности применения текстильных конструкционных композитов для основных и второстепенных несущих элементов конструкций представляются неограниченными, особенно в области средств передвижения, где существуют весовые ограничения.

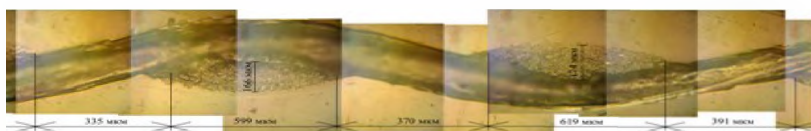
В процессе переработки текстильные каркасы испытывают различные виды нагружения, основными из которых являются двухосное растяжение и сжатие. Однако следует отметить, что ввиду абсолютной гибкости нитей сжатие в обычном смысле в направлении плоскости ткани невозможно, так как оно приводит к потере устойчивости текстильного каркаса. Существует и другой вид сжатия. Силы, осуществляющие такое сжатие, лежат в плоскости ткани и направлены поперек нитей. В составе тканого материала такое сжатие может быть осуществлено только совместно с растяжением второго семейства нитей. Например, при перемещении одного семейства нитей вдоль второго у последнего семейства возникают растягивающие напряжения. А первое семейство нитей сжимается в перпендикулярном направлении к нитям.

Следует также отметить, что рассматриваемый вид сжатия приводит к перемещениям, имеющим конечные значения. Дело в том, что при таких деформациях два семейства нитей ведут себя как два тела, переплетенные между собой, и имеющие возможность скользить друг относительно друга (в узлах переплетения нитей отсутствуют жесткие связи). При плоском напряженном состоянии в исходном положении точки соприкосновения нитей расходятся и находятся в разных местах одной и той же плоскости. При этом предполагается, что каждая нить семейства при перемещении не образует разрывов. Для твердых тел при таких перемещениях нарушаются условия неразрывности.

Для анализа изменения геометрии ткани Т-13А в процессе деформации сдвига были сделаны шлифы образцов, фиксирующие расположение и форму нитей в исходном и деформированном (при нагрузке 100 Н) состоянии сжатия. Рабочая зона образца ткани при испытании составляла 140 мм. В деформированном состоянии ткань была залита смолой с последующим отверждением.

Геометрическая модель тканей, представленная зависимостями (2.23), имеет веские основания к существованию для тканей, выполненных из многоволоконных нитей. Напомним, что зависимости (2.23) описывают форму сечения нити в тканях в виде луночки (ожевало). Многоволоконная нить имеет очень подвижное сечение, поддающееся любому внешнему воздействию и повторяющее форму поверхности опирающегося на него тела. В данном случае формообразующим телом являются нити второго семейства. Иначе говоря, нити обоих семейств в местах их контактов являются взаимно формообразующими. Пространственное представление зоны контакта двух нитей разных семейств представлено на рис. 2.6.

Исключительная податливость сечения нитей позволяет сформулировать гипотезу о том, что в зонах контакта нитей их взаимное давление практически равномерно. В таком случае граница каждой нити в районе контакта должна принимать форму дуги окружности. Следовательно, сечение нити в ткани должно иметь форму ожевала. Это подтверждается результатом фотографирования сечения ткани, представленным на рис. 2.18, *а*). Ткань в сжатом виде тоже имеет сечение нитей в форме ожевала (см. рис. 2.18, *б*). Таким образом, поворот семейств нитей не изменяет форму сечения нитей. Изменяются только параметры α , b , R в геометрической модели тканей, представленной зависимостями (2.23).



а)



б)

Рис. 2.18. Фотографии микрошлифов поперечного сечения ткани Т-13А: *а* – исходное состояние; *б* – деформированное

Имеются и другие модели, например, геометрическая модель Т.В. Чу и Т. Исикова [59]. Недостатком этой модели можно назвать отсутствие зазора между кромками соседних нитей, что делает невозможным смещение нити при сохранении ее формы. Такой зазор должен существовать даже после деформации сжатия (см. рис. 2.18). Модель, описанная в работе [60], предполагает наличие зазоров. Однако при малых зазорах (при поперечном сжатии нитей) данная форма нитей практически неосуществима, так как толщина нити становится соизмеримой с ее шириной, из энергетических соображений такая форма гибкой нити неустойчива.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод, что известные модели [59] и [60] в силу отмеченных недостатков для поставленной задачи трансформации требуют корректировки. В качестве таковой предлагается модифицированная модель, представленная зависимостями (2.23) и на рис. 2.18.

На основании проведенных исследований можно предположить, что в условиях поставленной задачи о сжатии тканого материала само сжатие осуществляется следующим образом. Происходят геометрические изменения параметров сечения нити до установления тех размеров, которые обеспечивают целостность ее формы независимо от величины приложенной внешней нагрузки. При этом изменяются два параметра: длина сечения нити в сторону уменьшения и угол α в сторону увеличения по сравнению с исходными размерами. Также происходит параллельный сдвиг нитей, уменьшая расстояния между соседними нитями.

Таким образом, сжатие сечения нити происходит в две стадии. На первой стадии «недоуплотненная» нить при формировании полотна ткани в результате ткачества получает «нормальное уплотнение» - это когда сечение нити уменьшается за счет более компактного расположения в сечении элементарных нитей. В результате, когда происходит сжатие семейства нитей, то на первой стадии нити доуплотняются, если ткань «недоуплотнена», и этого не происходит при «нормальном уплотнении». Размер b сечения нити при этом уменьшается даже при незначительной по величине сжимающей силе. Происходит необратимое сжатие. Вторая стадия сжатия семейства нитей характеризуется только упругими деформациями.

Рассмотренное сжатие нитей может образовываться и другим путем – в результате поворота одного семейства нитей относитель-

но второго. Такое сжатие тоже имеет неупругую составляющую и упругую часть. При деформации ткани оба эти вида сжатия могут присутствовать одновременно, причем они не заменяют друг друга. Проводились испытания, имитирующие оба эти сжатия. Было отмечено, что для осуществления неупругого сжатия при повороте семейств нитей требуется затратить гораздо меньшие усилия по сравнению с параллельным сдвигом. Объясняется это тем, что для тканей, пропитанных связующим, процессы сжатия сопровождаются внутренним трением вращения и внутренним трением скольжения. Здесь, по аналогии, можно провести сравнение внешнего трения вращения с внешним трением скольжения.

В какой-то мере упругая стадия сжатия семейства нитей похожа на сжатие упругого твердого тела. На этом основании можно руководствоваться построением линейных зависимостей между деформациями и напряжениями. Таким образом, в линейных формах аналогичного закона для тканых материалов должны присутствовать все компоненты напряжения, действующего в рассматриваемой точке соответствующего сечения нити. Такими являются напряжения растяжения, напряжения сжатия и незначительные касательные напряжения, вызванные силами трения в узлах переплетения нитей. Такие касательные напряжения намного меньше напряжений сжатия и растяжения, поэтому ими можно пренебречь [61]. В результате имеем следующие зависимости

$$\varepsilon_{12} = c_{11}\sigma_{12} + c_{12}\sigma_{22} + c_{13}, \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_{21} = c_{21}\sigma_{21} + c_{22}\sigma_{11} + c_{23}.$$

Здесь ε_{12} , σ_{12} – деформация и напряжение сжатия второго семейства нитей в направлении первого семейства; ε_{21} и σ_{21} – деформация и напряжение сжатия первого семейства нитей в направлении второго семейства; σ_{11} и σ_{22} – напряжение растяжения первого и второго семейств нитей. Постоянные c_{13} и c_{23} характеризуют необратимые деформации при сжатии. Ими нельзя пренебречь, так как для некоторых тканей они практически сравнимы с единицей. Например, для тканей, имеющих минимальную

плотность заполнения. Коэффициенты c_{ij} ($i, j = 1, 2$) – постоянные упругости.

Напряжения сжатия не могут существовать без растяжения во втором семействе нитей. Таким образом, следует предположить, что

$$\sigma_{11} = f_1(\sigma_{12}), \quad \sigma_{22} = f_2(\sigma_{21}).$$

Линеаризуя эти зависимости, приходим к выводу, что искомый закон для компонент деформации сжатия должен представляться следующим образом

$$\varepsilon_{12} = s_{11}\sigma_{12} + s_{12}\sigma_{21} + s_{13}, \tag{2.30}$$

$$\varepsilon_{21} = s_{21}\sigma_{21} + s_{22}\sigma_{21} + s_{23},$$

где s_{ij} ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$) - некоторые постоянные.

Рассмотрим теперь более подробно стадию упругого сжатия сечения нитей. Так как сечение нити состоит из сечений элементарных нитей, то следует рассматривать упругое сжатие пучка элементарных нитей. Такая объемная деформация должна развиваться в двух направлениях: в площади сечения и перпендикулярно ему. Площадь сечения состоит из отдельных маленьких площадей сечений элементарных нитей и свободных незаполненных площадок между ними. Такое обстоятельство позволяет компенсировать объемную деформацию при сжатии, в основном, уменьшением площади сечения нити. Следовательно, следует предположить, что при сжатии нитей практически отсутствует деформация в направлении по касательной к ним. Однако, если какая-то деформация и существует, то она никак не способствует сжатию второго семейства нитей – она направлена в противоположную сторону. В таком случае, если предположить, что происходит сжатие семейства нитей «2», а к нитям семейства «1» не приложена сжимающая сила, то в этом случае $\sigma_{21} = 0$. На основании замечания, сделанного выше, деформация сжатия у семейства нитей «2» тоже равна нулю. Вследствие этого в зависимостях (2.30) должны быть равными нулю и коэффи-

циенты s_{21} и s_{23} . Аналогично показывается, что если подвержены сжатию нити семейства «1», а к нитям семейства «2» не приложена сжимающая сила, то в этом случае должны быть равными нулю коэффициенты s_{12} и s_{13} . Равенство нулю необратимых деформаций s_{13} и s_{23} приводит к выводу, что проведенные исследования некорректны. Это не так. Для снятия полученного противоречия необходимо дополнительно уточнить: если материал не был ранее нагружен и напряжения равны нулю, то должны быть равными нулю и необратимые деформации. При возникновении соответствующих сжимающих напряжений любой положительной величины необратимые деформации возникают и остаются после снятия нагрузки.

С целью подтверждения настоящей гипотезы были проведены следующие испытания: заготовленный образец ткани подвергался растяжению постоянной нагрузкой в направлении второго семейства нитей. Первое семейство нагружалось таким образом, что крайние нити второго семейства перемещались к центру вдоль первого семейства нитей. Таким образом, были созданы условия для сжатия второго семейства нитей. Как и следовало ожидать, на всем диапазоне нагружения второго семейства нитей сжатием не наблюдалась деформация сжатия у первого семейства.

В результате получается, что для тканей гладкого переплетения зависимости (2.30) между деформациями сжатия и усилиями сжатия должны быть представлены следующим образом [62, 63]

$$\varepsilon_{12} = \frac{\sigma_{12}}{E_{12}} + \gamma_{12}, \quad \gamma_{12} = \begin{cases} 0, & \text{если } \sigma_{12} = 0, \\ \gamma_{12} > 0, & \text{если } \sigma_{12} > 0, \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\varepsilon_{21} = \frac{\sigma_{21}}{E_{21}} + \gamma_{21}, \quad \gamma_{21} = \begin{cases} 0, & \text{если } \sigma_{21} = 0, \\ \gamma_{21} > 0, & \text{если } \sigma_{21} > 0, \end{cases}$$

где ε_{12} , ε_{21} – относительные деформации семейств нити утка и основы при сжатии; σ_{12} , σ_{21} – усилия сжатия семейства нитей утка и основы, отнесенные к единице площади соответствующего сечения ткани; E_{12} , E_{21} – модули упругости при сжатии нитей

утка и основы; γ_{12} , γ_{21} – необратимые относительные составляющие деформаций при сжатии нитей утка и основы. В этом случае усилия сжатия σ_{12} и σ_{21} должны быть всегда положительными, что согласуется с физическим поведением семейств нитей в тканях (семейства нитей могут только растягиваться в продольном направлении и только сжиматься в поперечном).

Необратимые составляющие γ_{12} и γ_{21} соответствуют сжатию ячейки ткани, которое происходит на первой стадии. При этом $\gamma_{12} > 0$ и $\gamma_{21} > 0$. Однако, необходимо отметить, что коэффициенты γ_{12} и γ_{21} для стеклотканей, выпускаемых отечественной промышленностью, достаточно малы и не превосходят величины 0,1. Это свидетельствует о том, что рассматриваемые стеклоткани практически «нормально уплотнены». К этому следует добавить, что недоуплотнение влечет за собой уменьшение коэффициента армирования и увеличение коэффициентов γ_{12} и γ_{21} , так как их величины зависят не только от свойств материала нитей, но и от конструктивных особенностей строения ткани. Для сильно разреженных они сравнимы с единицей.

2.10. Уравнения равновесия структурной ячейки ткани при плоском напряженном состоянии препрегов

Вырежем ячейку ткани, состоящую из двух фрагментов нитей, принадлежащих нитям разных семейств. Действия отброшенных частей заменим силами. При этом указанный элемент ткани должен находиться в равновесии.

На рис. 2.6 показан этот элемент. Рассмотрим равновесие этого элемента, учитывая, что плоскость, на которой лежит ось нити семейства «2», составляет с осью Oz угол β . В условиях поставленной задачи фрагмент семейства нитей «2» нагружен симметрично, поэтому следует положить $N_{21} = N_{22} = N_2$, $\alpha_{21} = \alpha_{22} = \alpha_2$. Таким образом,

$$2N_2 \sin \alpha_2 \cos \beta = N_{11} \sin \alpha_{11} + N_{12} \sin \alpha_{12},$$

$$N_{11} \cos \alpha_{11} \cos \beta = N_{12} \cos \alpha_{12} + 2N_2 \sin \alpha_2 \sin \beta. \quad (2.32)$$

Здесь α_{11} и α_{12} – углы, которые составляют усилия \bar{N}_{11} и \bar{N}_{12} с осью Oz_1 , как показано на рисунке 2.6; α_{21} и α_{22} – соответствуют углам, которые составляют усилия \bar{N}_{21} и \bar{N}_{22} с осью Oz_3 ; уравнение моментов относительно оси Oz_3 не записано, так как оно не дает никакой информации для дальнейших исследований; остальные уравнения равновесия: проекция всех сил на ось Oz_3 и уравнения моментов относительно осей Oz_1 и Oz_2 удовлетворяются тождественно.

В тех местах, где нити соприкасаются, назовем их узлами, между нитями возникает контактное давление. Заменим эту распределенную нагрузку равнодействующей силой \bar{P} и приложим в этой точке силу \bar{F} , являющуюся силой сопротивления растяжению. На рис. 2.19 показаны все действующие силы, приложенные в указанных точках к элементу нити семейства «1».

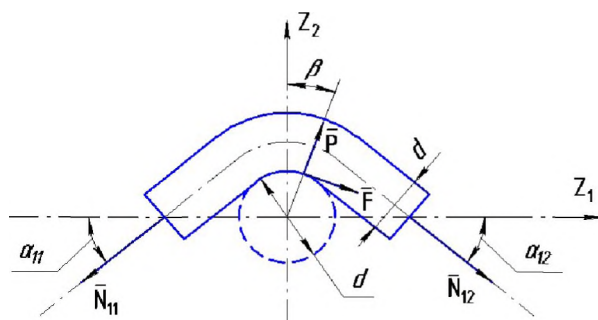


Рис. 2.19. Схема равновесия элемента нити семейства «1»

В результате условия равновесия рассматриваемого элемента нити представляются следующими зависимостями

$$\begin{aligned}
N_{12} \cos \alpha_{12} - N_{11} \cos \alpha_{11} + P \sin \beta + F \cos \beta &= 0, \\
N_{11} \sin \alpha_{11} + N_{12} \sin \alpha_{12} + F \sin \beta - P \cos \beta &= 0, \\
d(N_{11} - N_{12}) - \frac{1}{2} Fd &= 0.
\end{aligned} \tag{2.33}$$

Здесь d – толщина нити в районе узла (будем считать, что толщина нитей основы и утка равны между собой). Третье уравнение представляет собой условие равенства нулю суммы моментов всех сил относительно точки O . Круглое сечение нитей представлено для удобства исследования. Такое допущение не нарушает общности исследования.

Предположим теперь, что силы \bar{N}_{11} и \bar{N}_{12} имеют такое соотношение между собой, что сила трения \bar{F} становится равной предельной. Это означает, что должно выполняться равенство

$$F = k_{mp} P, \tag{2.34}$$

где k_{mp} – коэффициент трения скольжения между нитью первого семейства и нитью второго семейства в районе рассматриваемого узла.

Системы уравнений (2.32) и (2.33) с учетом зависимости (2.34) преобразуются к виду

$$\begin{aligned}
N_{11} (\cos \alpha_{12} - \cos \alpha_{11}) &= P (f_0 \cos \alpha_{12} - \sin \beta - k_{mp} \cos \beta), \\
N_{11} (\sin \alpha_{12} + \sin \alpha_{11}) &= P (f_0 \sin \alpha_{12} - k_{mp} \sin \beta + \cos \beta), \\
N_{11} (\cos(\alpha_{12} + \beta) - \cos(\alpha_{11} + \beta)) &= f_0 P \cos(\alpha_{12} + \beta).
\end{aligned} \tag{2.35}$$

Здесь $f_0 = k_{mp} / 2$.

Разрешим систему (2.35). Возможны два случая: $\alpha_{11} = \alpha_{12}$ и $\alpha_{11} \neq \alpha_{12}$. Предположим, что $\alpha_{11} = \alpha_{12}$. В результате из (2.35) получим

$$\begin{aligned} f_0 \cos \alpha_{12} - \sin \beta - k_{mp} \cos \beta &= 0, \\ \cos(\alpha_{12} + \beta) &= 0. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Решение системы (2.36) имеет вид

$$\beta = -\arctg \frac{k_{mp}}{1-f_0}, \quad \alpha_{12} = \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{k_{mp}}{1-f_0}. \quad (2.37)$$

Из предположения $\alpha_{11} = \alpha_{12}$ мы нашли величину угла α_{12} , которая определяется равенством (2.37). Анализ формул (2.37) показывает, что в этом случае $\alpha_{12} > \pi/2$. Однако, в реальных условиях угол α_{12} может изменяться только в пределах $0 < \alpha_{12} < \pi/2$. Отсюда следует, что в условиях рассматриваемой задачи равенство углов α_{11} и α_{12} невозможно.

Пусть теперь $\alpha_{11} \neq \alpha_{12}$. Разделим правые и левые части второго и третьего уравнений (2.35) на соответствующие выражения из первого уравнения. После преобразования получим

$$\begin{aligned} \sin\left(\beta + \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12}}{2}\right) + k_{mp} \cos\left(\beta + \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12}}{2}\right) &= f_0 \cos \frac{\alpha_{11} + \alpha_{12}}{2} \\ \sin\left(\beta + \frac{\alpha_{11} + \alpha_{12}}{2}\right) (\sin \beta + k_{mp} \cos \beta) &= f_0 \sin \beta \cos \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12}}{2}. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Разделим правую и левую части первого равенства зависимостей (2.38) на $\sqrt{1+k_{mp}^2}$. В результате найдем

$$\sin\left(\beta + \beta_0 + \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12}}{2}\right) = \frac{f_0}{\sqrt{1 + k_{mp}^2}} \cos \frac{\alpha_{11} + \alpha_{12}}{2},$$

где $\beta_0 = \arcsin \frac{k_{mp}}{\sqrt{1 + k_{mp}^2}}$.

Нагружение препрегов с целью получения окончательных размеров отверстий в изделии проводят, когда k_{mp} имеет наименьшее значение. Обычно это имеет место, когда связующее находится в состоянии наименьшей вязкости. Коэффициент трения, как установлено, при этом имеет величину меньшую, чем 0,1. В таком случае с достаточной степенью точности можно положить

$$\sin \beta_0 = \beta_0 = k_{mp},$$

$$\sin\left(\beta + \beta_0 + \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12}}{2}\right) = \beta + \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12}}{2} + k_{mp} = f_0 \cos \frac{\alpha_{11} + \alpha_{12}}{2}.$$

По той же причине из второго уравнения системы (2.35) найдем, что $\beta = -k_{mp}$. Таким образом, из системы (2.35), предполагая, что $k_{mp} < 0,1$, получим следующие зависимости

$$\beta = -k_{mp}, \quad \alpha_{11} - \alpha_{12} = 2f_0 \cos \frac{\alpha_{11} + \alpha_{12}}{2}, \quad (2.39)$$

$$\cos \beta \approx 1, \quad \alpha_{11} \approx \alpha_{12}.$$

В таком случае второе уравнение системы (2.32) можно упростить и записать его в виде

$$P = 2N_{11} \sin \alpha_{11}. \quad (2.40)$$

2.11. Моделирование деформации ячейки препрега при сжатии его в направлении ортогональном к направлению растяжения

На основании проведенных исследований можно предположить, что в условиях поставленной задачи сжатие препрега осуществляется следующим образом. Происходят геометрические изменения параметров ячейки до установления тех размеров, которые обеспечивают целостность ее формы независимо от величины приложенной внешней нагрузки. При этом изменяются два параметра ячейки: длина ячейки b_1 в сторону уменьшения и величина угла α_{12} в сторону увеличения по сравнению с исходными размерами. На основании зависимостей (2.23–2.25) и (2.39) имеют место равенства

$$R_1^k = \sqrt{\frac{3\gamma S_{01}}{4\alpha_{12}^k}}, \quad b_1^k = \sqrt{\frac{3\gamma S_{01}}{\alpha_{12}^k}}, \quad h_1^k = \frac{1}{2} \sqrt{3\gamma S_{01} \alpha_{12}^k}, \quad (2.41)$$

$$\alpha_{12}^{k-1} - \alpha_{12}^k = 2f_0 \cos \frac{\alpha_{12}^{k-1} + \alpha_{12}^k}{2},$$

где k – номер рассматриваемой ячейки. Анализ формул (2.41) показывает, что если следующая ячейка ткани находится в условиях сжатия, то у нее α_{12} будет меньше, чем у предыдущей ячейки.

Введем понятия: «недоуплотнение» нитей семейства при формировании полотна ткани – это такое состояние, при котором сжатие уменьшает площадь сечения нити и таким образом постоянная γ в соотношениях (2.24) еще не приняла своего минимального значения; «нормальное уплотнение» - это создание такого уплотнения ткани при ткачестве, при котором постоянная γ достигает своего предельного значения; «переуплотнение» – это тогда, когда постоянная γ достигла своего предельного значения, а уплотняющая сила имеет гораздо большую величину по сравнению со случаем «нормального уплотнения». В результате, когда происходит сжатие семейства нитей, то на первой стадии нити доуплотняются, если ткань «недоуплотнена», и этого не происходит при «нормальном

уплотнении». Размер ячейки b_1 при этом уменьшается даже при незначительной по величине сжимающей силе. Происходит необратимое сжатие. Вторая стадия сжатия семейства нитей сопровождается упругими деформациями.

На основании первого уравнения системы (2.32) соотношение (2.40) преобразуется к виду

$$P = 2N_2 \sin\alpha_2 \cos\beta. \quad (2.42)$$

Это означает, что сила взаимодействия \bar{P} между нитями, вызванная сжатием семейства нитей «2», зависит от усилия натяжения \bar{N}_2 этих же нитей. С другой стороны, если бы это было не так, то отсутствовало бы взаимодействие между нитями семейств, что эквивалентно условию $\bar{P} = 0$.

Введем в рассмотрение: σ_{22} – распределенное растягивающее напряжение для второго семейства нитей, лежащее в нейтральной плоскости ткани, и τ_{12}^{np} , которое определяет распределенную предельную силу трения скольжения между нитями семейств ткани, лежащую в ее нейтральной плоскости. В таком случае имеют место равенства

$$\sigma_{22}hb_1 = N_2 \cos\alpha_2, \quad (2.43)$$

$$\tau_{12}^{np}b_1b_2 = k_{mp}P \cos\beta,$$

где b_1 и b_2 – размеры ячейки ткани в плане в направлении первого и второго семейств нитей соответственно; h – толщина ткани.

Подставим теперь выражения для N_2 и P , найденные из (2.43), в соотношение (2.42). В результате найдем

$$\tau_{12}^{np} = \varphi(\alpha_{11})\sigma_{22}. \quad (2.44)$$

Здесь $\varphi(\alpha_{11}) = 2k_{mp}h \cos^2 \beta \sin \alpha_2 / (b_2 \cos \alpha_2)$. Все параметры k_{mp} , β , α_2 , b_2 , входящие в выражение для функции $\varphi(\alpha_{11})$, не зависят от переменной α_{11} кроме толщины ткани h . Толщина ткани представляет собой сумму толщин семейств нитей h_1 и h_2 . Толщина h_1 в условиях рассматриваемой задачи остается такой же как и после выработки ткани и определяется по формуле (2.24), а толщина нити h_2 семейства нитей «2» определяется по формуле (2.25). Таким образом

$$h = \frac{3}{2} \gamma m S_{01} + \frac{1}{2} \sqrt{3 \gamma S_{01} \alpha_{11}}.$$

В результате, подставляя все найденные зависимости в равенство (2.44), получим

$$\tau_{12}^{np} = k \left(\sqrt{\frac{S_{01}}{S_{02}} \alpha_{11} \alpha_2} + \alpha_2 \right) \operatorname{tg} \alpha_2 \sigma_{22}. \quad (2.45)$$

Толщина ткани, следовательно, и функция $\varphi(\alpha_{11})$ в пределах изменения угла α_{11} изменяются незначительно. В условиях сжатия угол α_{11} имеет свое предельное значение. Это происходит в случае, когда дальнейшее сжатие невозможно. Экспериментально установлено, что такое предельное значение для разных тканей – разное. Однако, оно всегда не больше двойного угла, который имеет место при выработке ткани. Если принять увеличение угла α_{11} в два раза по сравнению с исходным размером, то толщина h тоже увеличится, но не более чем на 20 %. Таким образом, в реальных условиях с учетом принятых допущений функцию $\varphi(\alpha_{11})$ практически можно считать постоянной. Это означает, что соотношение (2.45) можно аппроксимировать линейной зависимостью, представимой в виде

$$\tau_{12}^{np} = c_1 \sigma_{22} + \mu_1 P,$$

где c_1 и μ_1 - некоторые коэффициенты, характеризующие линейную зависимость.

Рассмотрим сжатие препрега в общем случае. Очевидно, что на величину силы взаимодействия \bar{P} между нитями семейств в их общей точке переплетения влияют не только усилие \bar{N}_1 , развиваемое в нити семейства «1», но и усилие \bar{N}_2 , имеющее место в нити семейства «2», а также сила давления $P_0 = pb_1b_2$, где p - давление сжатия слоев препрега в рассматриваемой точке.

Равновесия ячейки ткани и фрагмента нити семейства «1», принадлежащего вырезанной ячейке, в рассматриваемых условиях сжатия препрега выражаются соответствующими уравнениями равновесия, подобными системам (2.32) и (2.33). При этом система уравнений (2.32) имеет такой же вид, как и при простом сжатии, рассмотренном выше. Система уравнений (2.33) изменится, так как к элементу нити необходимо приложить еще и силу трения $F_0 = k_{mp}P_0$. Однако второе уравнение системы (2.33) не изменится.

В результате сила взаимодействия \bar{P} между нитями также будет выражаться равенством (2.42). Заметим, что зависимость (2.45) справедлива и для этого случая. При этом предыдущая формула для τ_{12}^{np} будет представима в виде

$$\tau_{12}^{np} = c_1 \sigma_{22} + \mu_1 p.$$

Можно пользоваться и полученной формулой, тем более, что проведенные эксперименты подтвердили ее справедливость для тканей гладкого переплетения, однако формула (2.45) показывает, что τ_{12}^{np} зависит от угла α_2 и таким образом возможна некоторая зависимость от напряжений σ_{11} другого семейства. Для учета такого влияния следует принять равенство

$$\tau_{12}^{np} = k_{11}\sigma_{11} + k_{12}\sigma_{22} + \mu_1 p, \quad (2.46)$$

$$\tau_{12}^{np} = k_{21}\sigma_{11} + k_{22}\sigma_{22} + \mu_2 p.$$

Второе уравнение системы (2.46) представляет собой линеаризацию зависимости (2.44) при сжатии семейства нитей «1».

2.12. Законы трения в условиях формирования стеклопластиковых оболочек

Все рассуждения о трении в препреге могут быть основаны на положениях, приведенных в монографии Крагельского И.В. [64]. Прежде всего, следует выяснить его природу и основные свойства. Для этого, в первую очередь ответим на вопрос: каково оно – внутреннее или внешнее? Это важный вопрос, так как в первом случае закономерности внешнего трения могли бы быть распространены на внутреннее трение, а во втором случае следует ожидать иных закономерностей.

Исследование механизма внутреннего трения показывает, что оно принципиально отлично от внешнего трения. Единственным сходством между ними будет то, что оба вида трения являются диссипативными процессами. Их различие, во-первых, в геометрии взаимодействия трущихся поверхностей. При внешнем трении соприкосновение двух тел происходит в отдельных точках. Контакт всегда дискретен. При внутреннем трении поверхность касания непрерывна и не зависит от нагрузки. Во-вторых, внутреннее трение характеризуется ламинарным перемещением материала в направлении вектора относительной скорости. При внешнем трении материал перемещается в направлении, перпендикулярном к вектору относительной скорости. В-третьих, при внешнем трении возникновение и разрушение связей должно локализоваться в тонком поверхностном слое, при внутреннем трении деформативная зона охватывает весь объем. Таким образом, необходимым условием для внешнего трения является наличие положительного градиента механических свойств каждого из трущихся тел по глубине. Для внутреннего трения наоборот, необходимо наличие отрицательного градиента механических свойств.

При тангенциальном перемещении внедрившаяся неровность гонит перед собой полусферическую волну деформированного мате-

риала. За внедрившейся неровностью материал сильно растянут. Некая точка, находящаяся на гребне волны впереди неровности, по мере её нахождения, будучи подмята индентором, опустится. Поэтому каждая точка на поверхности совершает колебания в плоскости, перпендикулярной к плоскости касания. Сопротивление осуществляется в дискретных точках. При внутреннем трении имеют место сдвиги материала в направлении движения в плоскости касания. В этом коренное кинематическое различие внешнего трения и внутреннего. Природа внутреннего трения едина, она связана с передачей количества движения от слоя к слою и поэтому обусловлена упругим деформированием.

Все признаки внутреннего трения имеют место при движении армирующего материала в препрегах. С другой стороны, если рассматривать препреги в виде многослойных структур, состоящих из нескольких слоев однонаправленных нитей, то при деформации силы трения возникают на поверхности соприкосновения этих семейств нитей, а это является внешним видом трения. Такая двойственность требует объяснения.

Существенным для понимания трения твердых тел является то обстоятельство, что вследствие шероховатости и волнистости поверхностей происходит внедрение трущихся материалов между собой. Какова же общая картина трения? Пусть две прижатые друг к другу поверхности взаимно перемещаются в тангенциальном направлении. Вследствие волнистости реальные точки касания расположены в некоторых областях, контурах. Вследствие различной высоты неровностей контактирующие точки оказываются внедренными на различную глубину и оказывают различное воздействие на контртело. Только касающиеся точки производят упругое деформирование материала. Вышедшие из зацепления контакты совершают колебания. Более внедрившиеся неровности пластически деформируют материал. Они гонят перед собой волну деформируемого материала. Работа пластической деформации непосредственно переходит в тепло. Наконец, сильно внедрившиеся неровности блокируют прилежащий материал и сдвигают, скальвают его, производя сильное разрушение. Такое нарушение фрикционной связи в практике называют задиром. Избегают его применением смазки. Если коэффициент молекулярного трения достаточно велик, то первый вид разрушения становится преобладающим и

внешнее трение неосуществимо. Таким образом, внешнее трение обязательно требует наличия менее прочной промежуточной прослойки между поверхностями, соприкасающимися с ней. Для большинства реально существующих соприкасающихся тел возникновение химической связи маловероятно без создания специальных условий: наличие свободных реакционных центров, обладающих химическим сродством друг к другу, а также наличие непосредственного контакта между реакционноспособными частями молекул, вероятность которого, с учетом микрошероховатостей поверхности, зависит, в свою очередь, от молекулярного взаимодействия. В случае препрегов, если полимеризация связующего отсутствует или она незначительна, то можно считать, что химическое или молекулярное взаимодействие отсутствует. Физическое или Ван-дер-вальдсово взаимодействие универсально и существует между любыми контактирующими телами.

В связи с перечисленными взаимодействиями поверхностей различают пять видов нарушения фрикционных связей: скол – срез материала (бугорков); пластическое оттеснение; упругое деформирование; разрушение пленок (адгезионное разрушение); разрушение основного материала (когезионное разрушение). В общем случае могут иметь место все пять видов. Таким образом, трение представляет собой смешанный процесс. В отдельных случаях превалируют некоторые из этих видов. Для приработанных поверхностей или при наличии смазки обычно превалирует упругое деформирование [65]. В этом случае остальными видами сопротивления можно пренебречь. Связующее, которое присутствует в препрегах, обладает всеми свойствами смазки. Таким образом, если будем считать, что трение в препреге является внутренним, то оно должно быть обусловлено упругими деформациями. С другой стороны, считая трение в препрегах внешним, мы приходим к выводу, что оно тоже обусловлено упругим деформированием. Отсюда полученное противоречие будем считать разрешенным.

Из сказанного необходимо сделать вывод, что трение, возникающее в препрегах при перемещении армирующего материала, сильно зависит от доли присутствия в препрегах связующего. Уменьшение толщины слоя связующего, обволакивающего стеклянные волокна, увеличивает влияние волнистости и шероховатости стекловолоконистой арматуры на коэффициенты трения. Однако

увеличение наноса связующего приводит к утолщению его слоя и к постепенному увеличению влияния связующего на силу трения. Иными словами, трение от граничного (внешнего) постепенно переходит к смешанному (полужидкостному), которое при полном разделении прослойкой связующего смежных слоев арматуры переходит в жидкостное (внутреннее) трение.

Внутреннее трение, при котором предотвращается непосредственный контакт и взаимодействие волокон стеклоарматуры полностью характеризуется взаимодействием между молекулами связующего и, следовательно, определяется его вязкостью, которая проявляется механически в виде касательных усилий сопротивления изменению его формы. Характерным для вязкости является ее зависимость от скорости деформации. Функционально эта зависимость задается в виде аналитической связи между касательным напряжением τ и градиентом скорости скольжения по толщине слоя связующего.

В общем случае деформация среды (трение, скольжение) начинается лишь после того, как напряжение достигает некоторого предельного τ^{np} , выше которого τ определяется лишь функцией от градиента скорости сдвига [66]

$$\tau = \tau^{np} + f\left(\frac{du}{dn}\right),$$

где u - скорость сдвига. Если сдвиг происходит с постоянной скоростью, то $\frac{du}{dn} = 0$ и в этом случае предельное напряжение сдвига тоже всегда будет постоянным. Отсюда можно сделать вывод в виде предложения: трансформация препрега должна происходить достаточно медленно с постоянной скоростью так, чтобы внутреннее перестроение армирующего материала осуществлялось полностью без задержек.

Что касается решения задачи об определении натяжения в нитях, то она должна решаться в случае предельного равновесия, когда нити находятся на грани срыва. Рассматривая эту задачу, когда нити не находятся на пороге равновесия, силы трения, вообще говоря,

не максимальны. Однако при малых скоростях движения максимальные силы трения покоя и силы трения движения практически совпадают [67].

2.13. Количественная оценка сил трения в препрегах, армированных тканями гладкого переплетения

2.13.1. Трение в узлах переплетения нитей, расположенных перпендикулярно друг к другу

Выведем формулы (2.46) другим способом. Для этого необходимо знать, что величина силы трения зависит от многих факторов, основными из которых являются: способ переплетения семейств нитей, состояние поверхности нитей, вязкость связующего, а, следовательно, температура композиционного материала, давление внутри слоев пакета и т.п. На этом основании при установлении функциональной зависимости для компонент предельной силы трения были приняты следующие гипотезы и предположения [68].

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.

Следует учесть, что в тех местах, где нити соприкасаются, между ними возникает контактное давление. Заменим контактную распределенную нагрузку равнодействующей силой \bar{P} и приложим в этой точке силы трения \bar{F}_1 и \bar{F}_2 . Сила \bar{F}_1 имеет направление вдоль нити утка, а сила \bar{F}_2 – вдоль нити основы, т.е. силы \bar{F}_1 и \bar{F}_2 являются проекциями силы трения \bar{F} на касательные к соответствующим нитям. Они возникают всегда, когда имеют место перемещения вдоль нитей. Предполагается не только растяжение нитей семейств, но и сжатие их в поперечном направлении. Таким обра-

зом, внешняя нагрузка, действующая на препрег, может вызвать сдвиговые деформации со смещением одного семейства нитей по отношению к другому. Сдвиговые деформации могут привести к изменению угла между нитями. Однако вначале рассмотрим случай, когда препреги армированы тканями гладкого переплетения, а при деформации угол между нитями семейств остается равным исходному 90° . Это, например, имеет место при параллельном сдвиге одного семейства нитей относительно другого.

Пусть под действием внешней нагрузки в материале препрега имеет место плоское напряженное состояние. В таком случае для изучения деформационного процесса достаточно рассмотреть поведение типичной ячейки ткани (рис. 2.5).

Типичная ячейка ткани может быть двух видов. Первый – ячейка состоит только из одной основной и одной уточной нитей, взаимодействующих в контактирующей области. Выделенные таким образом ячейки подобны друг другу. Второй вид типичной ячейки может быть образован сечениями ткани, проведенными вдоль направляющих нитей. Нормальное сечение ячейки второго вида показано на рис. 2.15.

Существуют три фактора, от которых зависит величина контактного давления. Во-первых, под действием внешнего давления возникают силы взаимодействия между слоями ткани. Такое взаимодействие, приложенное к типичной ячейке ткани, выражается величиной

$$P_1 = pab = pF_0, \quad (2.47)$$

где p – удельное давление сжатия слоев препрега в рассматриваемой точке; a и b – размеры в плане типичной ячейки ткани; a – ширина уточной нити; b – ширина нити основы; $F_0 = ab$.

Вторая компонента силы давления P_2 связана с растягивающей нагрузкой в нити утка. Растянутая нить утка соприкасается с контактной поверхностью нити основы. Считая нити абсолютно гибкими, можно утверждать, что нить утка в таких соприкосновениях приобретает форму в точности повторяющую поверхность нити основы. Рассматриваются многоволоконные нити. Для таких нитей характерно то, что в тканях они занимают такое положение, которое

обеспечивает им сильную расплюснутость сечения. Практически такое сечение можно сравнить с вытянутой луночкой (см. рис. 2.15).

Экспериментально установлено, что для тканей гладкого переплетения, выполненных из многоволоконных нитей, угол $2\alpha_2$ не превосходит 0,02 радиан. Это позволяет утверждать: радиус R_2 более чем на два порядка больше толщины ткани; давление нити утка по поверхности контакта нити основы распределено равномерно. Напряжения в нити, опирающейся на цилиндрическую поверхность, пропорциональны давлению, оказываемому нитью на эту поверхность. Таким образом, если принять за основу зависимость

$$\sigma = \frac{pR}{h}, \quad (2.48)$$

где σ – напряжения в нити; p – удельное давление, оказываемое нитью на опорную поверхность; R – радиус поверхности; h – толщина нити, то искомую компоненту силы давления P_2 можно определить по формуле

$$P_2 = N_1 \frac{h_1 Q_0}{Q_1 R_2}. \quad (2.49)$$

Здесь N_1 – усилие, растягивающее нить утка; Q_1 – площадь сечения нити утка; $Q_0 = ab$ – проекция площади типичной ячейки ткани на срединную плоскость; R_2 – радиус поверхности нити основы; h_1 – толщина нити утка.

Третья компонента P_3 силы давления P имеет линейную зависимость от силы давления нити основы на нить утка, так как растянутая нагрузкой N_2 нить основы опирается на цилиндрическую поверхность радиуса R_1 нити утка

$$P_3 = N_2 \frac{h_2 Q_0}{Q_2 R_1}, \quad (2.50)$$

где Q_2 – площадь сечения нити основы; R_1 – радиус поверхности утка; h_2 – толщина нити основы.

Каждой компоненте силы давления P соответствует своя сила трения. Поэтому

$$F_1 = \mu_{11}P_1 + \mu_{12}P_2 + \mu_{13}P_3, \quad (2.51)$$

$$F_2 = \mu_{21}P_1 + \mu_{22}P_2 + \mu_{23}P_3.$$

Здесь μ_{ij} ($i=1,2; j=1,2,3$) – некоторые постоянные коэффициенты, не зависящие от сил P_j ; F_1 – величина силы трения, которая является силой сопротивления при движении нити утка по поверхности контакта нити основы; F_2 – величина силы сопротивления движению нити основы по поверхности контакта нити утка.

Подставляя в (2.51) найденные значения для компонент силы давления P , получим

$$F_1 = \mu_{11}abp + \mu_{12} \frac{h_1 Q_0}{Q_1 R_2} N_1 + \mu_{13} \frac{h_2 Q_0}{Q_2 R_1} N_2, \quad (2.52)$$

$$F_2 = \mu_{21}abp + \mu_{22} \frac{h_1 Q_0}{Q_1 R_2} N_1 + \mu_{23} \frac{h_2 Q_0}{Q_2 R_1} N_2$$

Введем в рассмотрение величины: σ_{11} и σ_{22} – распределенные растягивающие усилия для первого (нити утка) и второго (нити основы) семейств нитей, действующие в срединной плоскости ткани; τ_1^{np} и τ_2^{np} – компоненты силы трения, которые определяют распределенную предельную силу трения скольжения между нитями семейств ткани (здесь индекс указывает нить, вдоль которой действует сила). Введенные величины выражаются равенствами

$$\sigma_{11}ha = N_1 \cos \alpha_2, \quad \sigma_{22}hb = N_2 \cos \alpha_1, \quad (2.53)$$

$$ab\tau_1^{np} = F_1, ab\tau_2^{np} = F_2.$$

Здесь $h = h_1 + h_2$ – толщина ткани; α_1 и α_2 определяют величины половинок угла в вершинах луночек соответствующего сечения нити (рис. 2.15).

Докажем правомочность введения таких распределенных напряжений. Поскольку внутри нитей между волокнами отсутствуют сдвигающие напряжения, то их отсутствие компенсируется изгибом нитей и деформацией их формы сечения. Покажем, что по этой причине равнодействующая всех сил любого сечения ткани, перпендикулярного к срединной плоскости, лежит в этой же плоскости. Такое поведение характерно для абсолютно гибких нитей. Для примера рассмотрим элемент ткани в виде структурной ячейки (рис. 2.5). Ее нормальное сечение обладает центральной симметрией (см. рис. 2.14).

На рис. 2.14 утраченные связи заменены силами. Здесь поперечная нить растягивается, а продольные нити сжимаются поперечной силой. Нормальное сечение нити утка перпендикулярно к срединной плоскости AB ткани.

Пусть равнодействующие сил каждого сечения не лежат в срединной плоскости, тогда они не лежат и на одной прямой. Их точки приложения расположены симметрично относительно общего центра симметрии. В этом случае вырезанный элемент не будет находиться в равновесии, так как момент всех сил не равен нулю. Полученное противоречие отвергает сделанное предположение.

Покажем теперь, что в любом сечении структурной ячейки ткани равнодействующая внутренних сил лежит в срединной плоскости. Для этого рассмотрим элемент ткани, у которого с одной стороны сечение проведено по краю ячейки, а с другой стороны сечение проходит внутри самой ячейки. Такой элемент должен находиться в равновесии. Равнодействующая всех сил в первом сечении, как установлено выше, лежит в срединной плоскости. Таким образом, для обеспечения условий равновесия вырезанного элемента необходимо и достаточно, чтобы равнодействующая всех сил для второго сечения была равна по модулю равнодействующей первого сечения, лежала на одной с ней прямой и имела противоположное

направление. Это означает, что равнодействующая всех сил для любого сечения ткани лежит в срединной плоскости ткани.

Возможность приведения внутренних сил к равнодействующей в срединной плоскости доказанная ранее позволяет ввести среднее значение напряжений по толщине ткани.

Подставим (2.53) в (2.52), и, считая постоянными $h, h_1, h_2, a, b, \alpha_1, \alpha_2, Q_0, Q_1, Q_2$, получим

$$\begin{aligned}\tau_1^{np} &= k_{11}\sigma_{11} + k_{12}\sigma_{22} + \mu_1 p, \\ \tau_2^{np} &= k_{21}\sigma_{11} + k_{22}\sigma_{22} + \mu_2 p,\end{aligned}\tag{2.54}$$

где $k_{11}, k_{22}, k_{12}, k_{21}, \mu_1, \mu_2$ - постоянные числа, отождествляемые с коэффициентами внутреннего трения (они определяются экспериментально). Эти числа выражаются через ранее введенные параметры $h, h_1, h_2, a, b, \alpha_1, \alpha_2, Q_0, Q_1, Q_2$ посредством зависимостей (2.52) и (2.53). Методика их определения и некоторые результаты экспериментальных исследований приведены в главе 3. Таким образом, зависимости (2.54) представляют собой искомые компоненты предельной силы трения скольжения между семействами нитей ткани.

Следует обратить внимание на то, что сила трения, определяемая зависимостями (2.54), предполагает анизотропию ее свойств. Это подтверждается, например, различием по величине коэффициентов μ_1 и μ_2 . По результатам проведенных экспериментальных исследований для ткани Т-13 $\mu_1 = 8,31$, а $\mu_2 = 16,102$. Это, несмотря на то, что ткань Т-13 полотняного переплетения и равнопрочна. Необходимо также добавить, что формула (2.54) позволяет находить силу трения с погрешностью не более 10%. Проверено для стеклоткани Т-13, угольной ткани 56313 и биаксиальной ткани ВХ-470. Для других тканей гладкого переплетения и мультиаксиальных тканей требуется проведение аналогичных исследований, однако, и в этих случаях можно предположить, что погрешность вычислений будет не более 10%.

2.13.2. Трение между неперпендикулярно ориентированными нитями

Соотношения (2.54) выведены в предположении, что угол между нитями семейств (угол между линиями нитей, лежащими в срединной плоскости ткани) равен 90° . Рассмотрим теперь случай, когда угол между нитями семейств равен $\alpha \neq \frac{\pi}{2}$, (см. рис. 2.20).

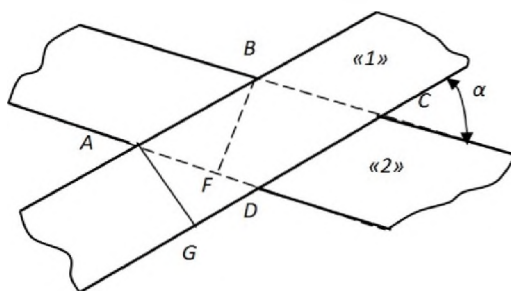


Рис. 2.20. Схема пересечения нитей

На рис. $AG = a$ – ширина нити утка; $BF = b$ – ширина нити основы;

$$AD = \frac{a}{\sin \alpha}; \quad BA = \frac{b}{\sin \alpha};$$

α – угол между нитями; «1» – нить утка; «2» – нить основы.

Вырежем ячейку ткани, состоящую из двух фрагментов нитей, принадлежащих нитям разных семейств. Полученные фрагменты нитей представляют собой прямоугольники в плане размером $a \times \frac{b}{\sin \alpha}$ для уточной нити и $\frac{a}{\sin \alpha} \times b$ – для нитей основы.

На рис. 2.21 показан этот фрагмент.

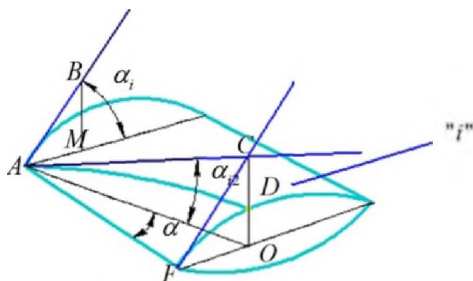


Рис. 2.21. Фрагмент нити i -го семейства

Здесь AB и AC – касательные в точке A к поверхности нити i -го ($i = 1, 2$) семейства; AD – линия, вдоль которой располагаются нити второго семейства; α_i – угол, характеризующий нормальное сечение нити i -го семейства; $\alpha_{1,2}$ – угол, который характеризует сечение i -ой нити, проведенное под углом α к образующей поверхности нити.

Линия AD представляет собой элемент дуги эллипса с полуосями R_1 и $\frac{R_1}{\sin \alpha}$ для нити утка и R_2 , $\frac{R_2}{\sin \alpha}$ — для нити основы. В силу малости дуги AD будем считать постоянной кривизну на этом участке. Радиусы кривизны этой дуги в точке D для нити утка и для нити основы соответственно равны

$$R_1^D = \frac{R_1}{\sin^2 \alpha}, \quad R_2^D = \frac{R_2}{\sin^2 \alpha}.$$

Отметим также, что и в этом случае давление p также состоит из трех составляющих. Величины этих составляющих определяются по формулам (2.47) – (2.50). Однако в этом случае $F_0 = \frac{ab}{\sin \alpha}$. Кроме того, вместо радиусов R_1 и R_2 , необходимо ввести значения R_1^D и R_2^D . В результате найдем

$$P_1 = p \frac{ab}{\sin \alpha}, \quad P_2 = N_1 \frac{h_1 ab}{F_1 R_2} \sin \alpha, \quad P_3 = N_2 \frac{h_2 ab}{F_2 R_1} \sin \alpha.$$

Подставляя эти значения в (2.50), получим

$$F_1 = \mu_{11} \frac{ab}{\sin \alpha} p + \mu_{12} \frac{h_1 ab}{F_1 R_2} \sin \alpha N_1 + \mu_{13} \frac{h_2 ab}{F_2 R_1} \sin \alpha N_2, \quad (2.55)$$

$$F_2 = \mu_{21} \frac{ab}{\sin \alpha} p + \mu_{22} \frac{h_1 ab}{F_1 R_2} \sin \alpha N_1 + \mu_{23} \frac{h_2 ab}{F_2 R_1} \sin \alpha N_2.$$

На основании введенных ранее обозначений (2.43) справедливы равенства

$$\sigma_{11} ha = N_1 \cos \alpha_{22}, \quad \sigma_{22} hb = N_2 \cos \alpha_{12},$$

$$ab\tau_1^{np} = F_1 \sin \alpha, \quad ab\tau_2^{np} = F_2 \sin \alpha.$$

Подставим эти равенства в (2.55). В результате, если угол между нитями семейства равен α , то силы трения скольжения определяются по формулам

$$\tau_1^{np} = (k_{11}\sigma_{11} + k_{12}\sigma_{22}) \sin^2 \alpha + \mu_1 p, \quad (2.56)$$

$$\tau_2^{np} = (k_{21}\sigma_{11} + k_{22}\sigma_{22}) \sin^2 \alpha + \mu_2 p.$$

Функциональные зависимости (2.56) отражают значения компонентов предельной силы трения в случае, когда угол между нитями отличен от прямого угла.

2.14. Трение в препрегах, армированных мультиаксиальными тканями

Пусть в препрегах в качестве наполнителя используются мультиаксиальные стеклоткани. Для таких тканей тоже можно ставить вопрос о нахождении предельной силы трения. Как было показано, мультиаксиальная ткань – это текстильный нетканый материал, состоящий из нескольких слоев нитей, прошитых полиэфирной нитью. Каждый слой состоит из однонаправленных нитей, ориентированных в направлении в соответствии с требуемой схемой армирования. Если многоволоконная стеклонить является некрученной или слабо крученной, то под действием внешней нагрузки она может двигаться в продольном направлении, несмотря на присутствие прошивной нити, которая находится в натянутом состоянии и окаймляет слой стеклонитей в соответствии со схемой на рис. 2.22

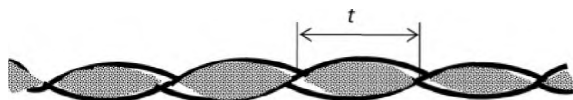


Рис. 2.22. Поперечное сечение мультиаксиальной ткани в направлении прошивной нити

Здесь на рис.2.22 t – длина стежка.

Прошивная нить может быть в исполнении как прямолинейной, так и зигзагообразной. Будем рассматривать случай, когда она является прямолинейной. Прошивная нить, состоящая из двух нитей – нижней и верхней, образует ячейки длиной t , внутри которых находятся стеклонити основных слоев мультиаксиальной ткани. Так как прошивная нить в результате ткачества находится в натянутом состоянии, то нити основных слоев в каждой ячейке испытывают действие внешнего давления совершенно аналогичное, как и в случае с тканями гладкого переплетения. Таким образом, к каждому семейству нитей основных слоев можно применить закон (2.56). В результате получим

$$\tau_i^{np} = k_i \sigma_n \sin^2 \alpha_i + \mu_i p, \quad (2.57)$$

где i – номер слоя; α_i – угол, который составляет i -ый слой стеклонитей с прошивной нитью; σ_n – напряжение растяжения в прошивной нити; k_i и μ_i – постоянные числа, отождествляемые с коэффициентами внутреннего трения. Необходимо также отметить, что формула (2.57) справедлива и для случая, когда в результате деформирования угол α_i изменяет свою величину. При этом, очевидно, может изменять свое значение и напряжение σ_n в прошивной нити. В отдельных случаях можно установить величину σ_n в зависимости от угла α_i .

Пусть мультиаксиальная ткань состоит из одного семейства нитей и пусть угол, который составляет семейство нитей с прошивной нитью, равен α_1 . Крайние точки стежка (узлы крепления) длиной t отделяют от других нитей семейства группу нитей шириной $t \sin \alpha_1$. Пусть в результате деформации угол α_1 изменился и стал равным α . Ширина рассматриваемой группы семейства нитей в результате должна стать равной $t_1 \sin \alpha$, где $t_1 = (1 + \varepsilon_1)t$ – длина стежка после деформации. Возможность такого представления определяет условия для осуществления поворота семейства нитей относительно прошивной нити. Пусть угол α_1 заключен в пределах $\alpha \leq \alpha_1 < 0,5\pi$. В этом случае в результате деформации ширина нитей, ограниченных стежком t , должна уменьшиться в результате их сжатия, а длина стежка увеличивается в результате растяжения. Считаем, что узлы крепления не перемещаются вдоль прошивной нити. Таким образом, стежок t может увеличиваться только от растяжения прошивной нити. Эти обстоятельства равносильны следующим зависимостям

$$t \sin \alpha_1 > (1 + \varepsilon_1)t \sin \alpha = t(1 - \varepsilon_2) \sin \alpha_1. \quad (2.58)$$

Здесь ε_1 – относительное упругое удлинение прошивной нити; $\varepsilon_2 = \gamma_{12} + \varepsilon_{12}$; γ_{12} – неупругое относительное сжатие стеклонитей в

поперечном направлении к ним; ε_{12} – упругое относительное сжатие стеклонитей в поперечном направлении к ним.

Сжатие стеклонитей состоит из двух стадий. На первой стадии даже при небольшой по величине силе происходит неупругое сжатие, в результате чего площадь сечения нитей уплотняется за счет пустот созданных при ткачестве. Относительная деформация γ_{12} при этом может быть $\gamma_{12} > 0,1$ и составляет главную часть деформации ε_2 . На этой стадии узлы крепления не могут перемещаться вдоль прошивной нити (при определенных условиях они могут передвигаться только на упругой стадии). Вторая стадия сжатия семейства нитей сопровождается упругими деформациями, а семейство нитей ведет себя как твердое упругое тело.

В соответствии с установленными стадиями для сжатия можно разделить поворот стеклонити на неупругий и упругий. Неупругий поворот осуществляется даже при незначительной по величине силе, а угол поворота можно определить из (2.58), полагая ε_1 и ε_{12} равными нулю (величины ε_1 и ε_{12} значительно меньше γ_{12})

$$\sin \alpha = (1 - \gamma_{12}) \sin \alpha_1. \quad (2.59)$$

При $\alpha_1 < \alpha < \pi - \alpha_1$ ширина нитей, расположенных в стежке, может увеличиваться, а длина стежка должна уменьшаться. Такие деформации являются неупругими, так как увеличение ширины нитей приводит только к созданию пустот в нормальном сечении нитей, а уменьшение стежка – к сжатию прошивной нити. Прошивную нить считаем абсолютно гибкой, поэтому такое сжатие, даже при небольшой силе приводит к потере ее устойчивости.

На основании проведенного анализа делаем вывод: неупругий поворот семейства нитей относительно прошивной нити, если $\alpha_1 < \frac{\pi}{2}$, осуществляется в пределах

$$\arcsin[(1 - \gamma_{12}) \sin \alpha_1] < \alpha < \pi - \arcsin[(1 - \gamma_{12}) \sin \alpha_1]. \quad (2.60)$$

Эта же формула справедлива также, если $\alpha_1 > \frac{\pi}{2}$.

Проведенные рассуждения можно использовать также и для мультиаксиальных тканей, состоящих из более одного семейства стеклонитей. Например, для биаксиальных тканей можно воспользоваться зависимостью (2.60) для каждого семейства стеклонитей.

Полученная зависимость (2.60) показывает, что при деформации биаксиальной ткани, прошитой нитью с прямолинейной строчкой, неупругие деформации происходят в довольно большом диапазоне. Отметим, что такие деформации не изменяют напряженного состояния в прошивных нитях. Поэтому первое слагаемое в зависимостях (2.57) можно считать постоянным. Прошивные нити, исполнением в виде зигзагообразной строчки, имеют значительно большую неупругую составляющую деформации при повороте армирующего материала по сравнению с ее прямолинейным исполнением. На этом основании закон (2.57) для мультиаксиальных тканей, применительно к условиям деформирования препрегов при трансформации цилиндрической оболочки в торовую, можно записать в виде

$$\tau_i^{np} = \tau_i^0 + \mu_2 p_i, \quad (2.61)$$

где τ_i^0 – предельное значение внутреннего трения i -го слоя нитей мультиаксиальной ткани, зависящее от состояния поверхности нитей, угла укладки нитей, способа формирования прошивной нити, температуры и т.д.

Для нитевой и жгутовой намотки стеклопластиковых оболочек препреги получают в виде двух семейств однонаправленных нитей симметричной структуры. Предельные значения внутренних сил трения в этом случае на основании (2.61) имеют вид

$$\tau_i^{np} = \mu_3 p_i. \quad (2.62)$$

Литература

1. Freeston W.D., Claus W.D., J.Appl. Phys., 44 (1973) 3130.
2. Skelton J., J.Mater., 6 (1971) 656.
3. Task Committee on Air Supported Structures of the Committee on Metals of the Structural Division, ASCE, State of the Art Report on Air Supported Structures, ASCE, New York, 1979.
4. Schippel H.F., Ind. Eng. Chem., 15 (1923) 1121.
5. Hofferberth W., Kautsch. Gummi, 8 (1955) 124.
6. Adkins J.E., Rivlin R.S. Trans. R. Soc. London Ser. A., 248 (1955) 210.
7. Akasaka T., Proc. 2nd Jpn. Congr. Testing Mater., Kyoto, 1959, pp. 217-220.
8. Clark S.K., Text Res. J., 33 (1963) 295.
9. Martin F., Jahrb. Dtsch. Luftfahrtforsch., 1 (1939) 470.
10. Gough V.E., Automob. Engr. (London), 39 (1949) 97.
11. Rotta J., Ing. Arch., 17 (1949) 129.
12. Hadekel R., S&T Memo. No. 5/50, British Ministry of Supply, TPA3/TIB, 1950.
13. Loughborough D.L., Davies J.M., Monfore G.M., Can. J. Res., 28 (1951) 490.
14. Turner D.M., Proc.3rd Rubber Tech. Conf., London, 1954, Hef-fer, Cambridge, 1954, pp. 735-748.
15. Fiala E., VDI Z., 96 (1954) 973.
16. Biderman V.L., Trans. Tire Res. Inst. (Moscow), 3 (1957) 16.
17. Berger M., J. Appl. Polym. Sci., 11 (1959) 174.
18. Lauterbach H.G., Ames W.F., Text. Res. J., 29 (1959) 890.
19. Pugin V.A., Sov Rubber Technol., 21 (1962) 8.
20. Bukhin B.L., Sov. Rubber Technol., 22 (1963) 38.
21. Biderman V.L. Sov. Rubber Technol., 19 (1960) 10.
22. Frank F., Kautsch. Gummi, 18 (1965) 515.
23. Böhm F., Automobiltech. Z., 69 (1967) 255.
24. Haas R., NACA Tech. Rep., 16 (1917) 166.
25. Topping F.D., Aerospace Eng., 20 (1961) 18, 53.
26. Turner H.M., Aerospace Eng., 21 (1962) 33.
27. Stein M., Hedgpeth J.M., NASA Tech. Note, D-813 (1961) 1.
28. McComb H.G., Jr., Zender G.M., Mikulas M.M., Jr., NASA Tech. Note, D-1510 (1962) 229.

29. Jahsman W.E., *J. Appl. Mech.*, 32 (1965) 372.
30. Akasaka T., Yamagishi K., *Bull. Sci. Eng. Chuo Univ.*, 9 (1966) 136.
31. McComb H.G., Jr., *NASA Tech. Note, D-930* (1961) 1.
32. Stroud W.J. *NASA Tech Note, D-931* (1961) 1.
33. Akasaka T., Asano K., Masuda H., Tsutsumi S., *Bull. Sci. Eng. Fac. Chuo Univ.*, 23 (1980) 163.
34. Akasaka T., Asano K., Rfbc K., *Trans. Jpn. Soc. Compos. Mater.*, 4 (1978) 12.
35. Walter J.D., Avgeropoulos G.N., Janssen M.L., Potts G.R., *Tire Sci. Technol.*, 1 (1973) 210.
36. Walter J.D., Patel H.P. *Rubber Chem. Technol.*, 52 (1979) 710.
37. Akasaka T., Hirano M., *Compos. Mater. Struct.*, 1 (1972) 70.
38. Perice F.T., *J. Text. Inst.*, 28 (1937) T45.
39. Hearle J.W.S., Grossberg P., Backer S., *Structural Mechanics of Fibers, Yarns and Fabrics*, Wiley, New York, 1969.
40. Kawabata S., Niwa M., Kawai H., *J. Text. Inst.*, 64 (1973) 21, 47, 62.
41. Hearle J.W., Thwaites J.J., Amirbayat J. (eds.), *Mechanics of Flexible Fibre Assemblies*, NATO ASI Series, Sijthoff and Noordhoff, 1980.
42. Ishikawa T., Chou T.W., *Mater. Sci.*, 17 (1982) 3211.
43. Moghe S.R. in ref. 6, p. 159.
44. Moghe S.R., *Presentation at Fiber Society Meeting, Raleigh, NC*, 1982.
45. Stubbs N., Thomas S., in S. Nemat-Nasser (ed.), *Mechanics of Materials, Vol. 3*, Eisevier, Amsterdam, 1984, pp. 157-168.
46. Тканые конструкционные композиты / Т.- В. Чу [и др.]; под общ.ред. Т.- В. Чу и Ф.Ко; пер. с англ. Н.П. Желудя и В.Л. Кулакова. – Москва: МИР, 1991. – 480 с.
47. Дамянов, Г.Б. Строение ткани и современные методы ее проектирования / Г.Б. Дамянов, Ц.З. Бачев, Н.Ф. Сурнина; под ред. Г.Б. Дамянова.– Москва: Легкая и пищевая промышленность. – 1984. – 189 с.
48. Мартынова, А.А. Лабораторный практикум по строению и проектированию тканей / А.А.Мартынова, Л.А. Черникина. – Москва: Легкая и пищевая промышленность. – 1976. – 114 с.

49. Оников, Э.А. О геометрическом методе анализа и построения тканей полотняного переплетения / Э.А. Оников, Л.А. Саукова, Е.О. Горбунова // Текстильная промышленность. – 1964. – №1. – С. 50-55.
50. Кутепов, О.С. Строеение и проектирование тканей / О.С. Кутепов. – Москва: Легпромбытиздат. – 1988. – 112 с.
51. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твердых тел: монография / В.Е. Быховцев - Гомель: ГГУ им. Франциска Скорины, 2007. – 219 с.
52. Дукельский, А.И. Подвесные канатные и кабельные краны / А.И. Дукельский. – Москва: Машгиз. – 1951. – 215 с.
53. Качурин, В.К. Гибкие нити с малыми стрелками / В.К. Качурин. – Москва: ГИТТЛ. – 1956. – 137 с.
54. Справочник проектировщика / А.А.Уманский [и др.]; под общ.ред. А.А.Уманского. – Москва: Госстройиздат, 1960. – 356 с.
55. Whintey, J.M. Stress analysis of thick laminated composite and sandwich plates / J.M. Whintey // J. Compos. Mater. – 1972. – № 6. – P. 426-440.
56. Колганов, В.И. Теоретические и экспериментальные исследования композиционных систем на стадии формования изделий / В.И. Колганов, А.В. Колганов, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко, Л.М. Кришнев, А.А. Кульков // Проблемы создания новых материалов для авиакосмической отрасли в XXI веке: материалы межотраслевой научно-практической конференции, Москва, 25-26 июня 2002 / Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. – С. 55-60.
57. Колганов, В.И. Особенности построения методики эксперимента для нахождения коэффициентов внутреннего трения препрегов / В.И. Колганов, А.В. Колганов, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко // Неразрушающий контроль и диагностика: материалы XVI Российской научно-технической конференции, С-Пб, 9-12 сентября 2002 – С. 19-22.
58. Егер, Дж.К. Упругость, прочность и текучесть / Дж.К. Егер. – Москва: Машгиз, 1961. – 247 с.
59. Чу Т. – В., Исикава Т. Анализ и моделирование двухмерных тканых композитов [Текст] / В кн. Тканые конструкционные композиты. –М.: Мир, 1991, с. 243 – 301.

60. Xue P., Cao J., Chen J. Integrated micro/macro-mechanical model of woven fabric composites under large deformation [Text] // Composite Structures, v. 70, 2005, p. 69 – 80.

61. Kawabata, S. Proc. 14 th Text. Res. Symp. At Mt. Fuji, 1985, The Textile Machinery Society of Japan, Osaka, 1985. - P.1.

62. Комков, М.А. Сдвиговые перемещения нитей в неотвержденных тканых композитах под действием внешних нагрузок / М.А.Комков [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.: НТЦ «Информтехника». – Вып. 1(134) – 2 (135). - 2004. - С.51-55.

63. Колганов, В.И. Моделирование процессов растяжения и сжатия в материале препрегов при выполнении отверстий/В.И.Колганов, А.В.Колганов, В.М. Сахоненко, С.В. Сахоненко // Вопросы оборонной техники. Серия 15, Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – Москва: НТЦ «Информтехника», 2004. – Вып. 1(134)-2 (135). – С. 31-37.

64. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В.Крагельский. – М.: Машиностроение, 1962. – 370 с.

65. Дерягин Б.В. Физико-химия нанесения тонких слоев на движущуюся подложку / Б.В.Дерягин, С.М.Левин. – М.: изд. АН СССР, 1959. – 391 с.

66. Цыплаков О.Г. Основы формирования стеклопластиковых оболочек / О.Г. Цыплаков. – Л.: Машиностроение, 1965. – 183 с.

67. Дерягин Б.В. Что такое трение? / Б.В.Дерягин. – М.: изд. АН СССР, 1963. – 270 с.

68. 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.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМИРОВАННЫХ ПРЕПРЕГОВ

3.1. Требования к методикам испытаний препрегов

В отличие от традиционных конструкционных материалов препреги обладают специфическими свойствами, которые надо учитывать при проведении механических и других видов испытаний. Прежде всего, эти материалы практически невозпроизводимы, если не будут строго регламентированы технология, условия кондиционирования, испытания и трансформации в процессе изготовления изделия. Поскольку препреги являются гетерогенными материалами, их свойства будут обуславливаться свойствами отдельных определяющих компонентов. Свойства препрегов при проведении испытаний должны соответствовать условиям их переработки, т.е. учитывать влияние окружающей среды, температуры, внешней нагрузки.

Существенным для препрегов является то, что один из компонентов – связующее, находится в жидком состоянии. Это позволяет препрегам быть эластичными. Определяющую роль при формовании изделий играют силы трения. Армирующий материал в виде нитей не связан тесно друг с другом в узлах переплетения, что объясняет возможность сдвига со смещением одной нити относительно второй. Такие деформации значительны, другими словами, конечны и, несмотря на это, во многих случаях не приводят к разрушению армирующего материала.

Соблюдение требований о моделировании реальных технологических режимов обязательно, так как это может порождать несоответствие методик испытаний с заложенными в них требованиями. Для получения сопоставимых данных при таком подходе к исследованию свойств препрегов и их научного обобщения необходимо иметь соответствующие информационные данные и соблюдать определенные правила:

– полную характеристику испытываемого материала – тип материала (состав, соотношения компонентов, схемы укладки арматуры), режимы изготовления, формы и размеры исходной заготовки и т.п.;

- форму, размеры и способ изготовления образцов, условия кондиционирования образцов, способ закрепления, количество образцов для эксперимента;
- характеристику испытательной машины и измерительной аппаратуры, характеристику окружающей среды, температуру;
- режим нагружения – способ приложения нагрузки, скорость нагружения;
- способ обработки экспериментальных данных и доверительные интервалы (ошибка, разброс).

При построении методик испытаний будем соблюдать два принципа. Одно утверждение (принцип «размазывания»): Альперин [1] основано на том, что число армирующих элементов достаточно велико и поэтому армированный материал можно приближенно заменить квазиоднородным анизотропным материалом. Этот материал является обобщением классической среды, рассматриваемой в теории упругости анизотропного тела. Другим принципом является рассмотрение материала без учета влияния связующего. При этом предполагается, что всю нагрузку воспринимают волокна. Давление, возникающее в связующем, в результате деформации препрега, со временем выравнивается, поскольку арматура препрега представляет собой пористую среду. Только после выравнивания давления процесс деформирования препрега завершается. На этом основании можно считать, что связующее не оказывает существенного влияния на напряженное состояние в нитях препрега. Связующее играет роль смазки, уменьшая силы трения в узлах переплетения нитей.

Рассматриваемые препреги представляют собой слоистые композиты, армированные нитями под углом $\pm\varphi_0$, т.е. они имеют регулярную структуру и, следовательно, обладают четко выраженной анизотропией каждого слоя. На этом основании, если рассматривать задачи, которые приводят к деформациям, не выходящим за рамки слоев, такую систему можно рассматривать как плоскую. Это оправдывает применение в испытаниях образцов, изготовленных из тканого материала.

Задачей настоящего раздела является установление методик проведения испытаний для определения тех характеристик препрега, которые используются в расчетных формулах, полученных в

предыдущей главе. Таким образом, необходимо разработать методики испытаний для определения коэффициентов внутреннего трения μ_1 , μ_2 , k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} ; напряжений растяжения σ_{10} , σ_{20} в армирующем материале, определяющем предсдвиговое состояние; τ_1^0 , τ_2^0 - предельных значений внутреннего трения нитей у биаксиальной ткани; μ_0 - коэффициента, отражающего линейную зависимость между модулем сдвига и давлением у препрегов; m_1 и m_2 - максимального и минимального относительного неупругого удлинения при растяжении и сжатии тканого армирующего материала соответственно в поперечном и продольном направлениях к полотну ткани.

Для проведения испытаний необходимы: образец, изготовленный из испытываемого материала, механизмы (испытательные машины и оборудование), нагружающие образец и измеряющие величину прилагаемых нагрузок, приборы, которые измеряют деформации образца. Образец должен обладать такой формой, чтобы в его рабочей части во время испытаний осуществлялось требуемое напряженное состояние.

Особое внимание при проведении испытаний уделяется способу крепления образцов. Во-первых, способ крепления образцов должен быть таким, чтобы устранялась возможность их разрушения в самом зажимном устройстве. Во-вторых, оно должно быть достаточно надежным, чтобы не было смещений образца в месте закрепления. Размеры образцов должны быть такими, чтобы обеспечивались: то напряженное состояние, которое соответствует напряженному состоянию в изделии; точность отсчета деформации и можно было бы пренебречь влиянием краевого эффекта.

Основной целью механических испытаний (прочностных и деформационных) всех материалов является опытная оценка тех их физических свойств, которые непосредственно характеризуют механическую прочность. Отсюда происходит и название этих свойств – механические. Физическая природа прочности материалов ещё далеко не выяснена. Не вдаваясь в подробности, будем понимать под механической прочностью материала его способность противостоять механическому разрушению или выдерживать деформирование без разрушений. Под разрушением следует подра-

зумевают необратимое микроскопическое разделение материала, как механического целого, на отдельные части, включая сюда и появления трещин.

Прочность материала обычно оценивается величиной усилий, напряжений или работы, которые материал выдерживает при различных способах нагружения вплоть до разрушения. Кроме того, при оценке прочности материала необходимо принимать во внимание данные о его составе, особенности строения, методе получения, предварительной обработке – все то, что называют «предисторией» материала. Прочность нельзя характеризовать вне связи с напряженным состоянием, в котором находится материал. Однако стремление найти обобщенное выражение механической прочности, не зависящее от напряженного состояния, – одна из основных задач изучения механических свойств материала.

Оборудование для проведения испытаний, методики проведения испытаний и порядочность испытателей обеспечивают достоверность и точность проведения исследований. Все эти факторы способствуют развитию вместе с предприятием, которому они служат.

Имеется ещё один фактор, подтверждающий достоверность результатов испытаний, – это многократность проведения независимых испытаний различными исследователями. В случае с препрегами все исследования проведены на предприятии ОАО «Авангард» впервые, повторение испытаний другими исследователями, к сожалению, не проводились. Оборудование, которым укомплектована центральная заводская лаборатория ОАО «Авангард», позволяет производить жесткостные и прочностные испытания при растяжении, сжатии, изгибе, срезе и сколе для композиционных материалов. Имеется цех по проведению испытаний внутренним давлением до 30 МПа и осевой силой до 100000 кН. Это покрывает весь перечень исследований композиционных материалов, который дополняется проведением ускоренных климатических испытаний. Для таких испытаний имеются специальные термощкафы различных модификаций. Всё вместе позволяет устанавливать гарантийный срок службы изготавливаемых изделий и проводить некоторые научно-исследовательские работы. Следует также добавить, что необходимость иметь на предприятии высокотехнологичную лабораторию для проведения испытаний вытекает из требования по обеспечению должного уровня производства изделий.

3.2. Расчетные обоснования методик испытания препрегов

Для более глубокого понимания всех процессов, происходящих внутри исследуемых материалов необходимо, прежде всего, ознакомиться с результатами проведенных экспериментальных исследований. Так как обычно напряжения и деформации в одном направлении сопровождаются соответствующими явлениями в перпендикулярном направлении, то желательно только оценить, какая реальная система может рассматриваться как плоская задача. Очевидно, что визуально это можно оценить по деформациям.

Рассмотрим несколько простейших частных случаев нагружения препрегов, отнесенных к главным осям с целью максимального упрощения нахождения по ним характеристик препрегов. Таким образом, для определения коэффициентов трения μ_1 , μ_2 , k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} , напряжений σ_{10} , σ_{20} и жесткостных характеристик γ_{11} , γ_{12} , γ_{21} , γ_{22} , E_{11} , E_{12} , E_{21} , E_{22} необходимо провести соответствующие испытания и затем, путем сравнения нагрузок и перемещений, полученных экспериментальным путем и вычисленных аналитически, определить искомые значения коэффициентов. Количество таких видов испытаний равно трем. Первый вид испытаний заключается в параллельном перемещении нитей одного семейства в направлении нитей второго семейства. Измеряются усилия и соответствующие перемещения в результате такого действия. Второе испытание заключается в том, что к концу одной нити прикладывается достаточная по величине внешняя сила. При этом измеряется перемещение конца нити и усилие, затраченное на это перемещение. Более подробное описание этих испытаний приведено ниже. Третий вид испытаний – это двусосное растяжение полосы ткани.

Пусть тканый препрег расположен между двумя жесткими поверхностями, создающими давление внутри препрега равное p . На всю глубину ткани вставлены две гребенки (рис. 3.1), нагруженные силами T . Их параллельное смещение позволяет сдвигать поперечные нити вдоль продольных. Одновременно поперечные нити растянуты силами Q и находятся под напряжением q . В процессе испытаний при установившемся равновесии измеряют силы T_i , приложенные к гребенкам, и перемещения гребенок W_i .

Расположим систему координат Oxy так, чтобы ось Ox была направлена вдоль первого семейства нитей, по которому происходит перемещение, а ось Oy вдоль второго семейства нитей. Отметим, что равновесие поперечного семейства нитей тканого препрега вдоль оси Ox будет иметь место в том случае, если касательные напряжения от сил трения скольжения будут равны своему предельному значению τ_{12}^{np} или τ_{21}^{np} в зависимости от того, как направлена ось Ox : вдоль основы или вдоль утка. Перемещения продольного семейства нитей в направлении оси Oy отсутствуют, т.е. рассматривается одноосное напряженное состояние препрега.

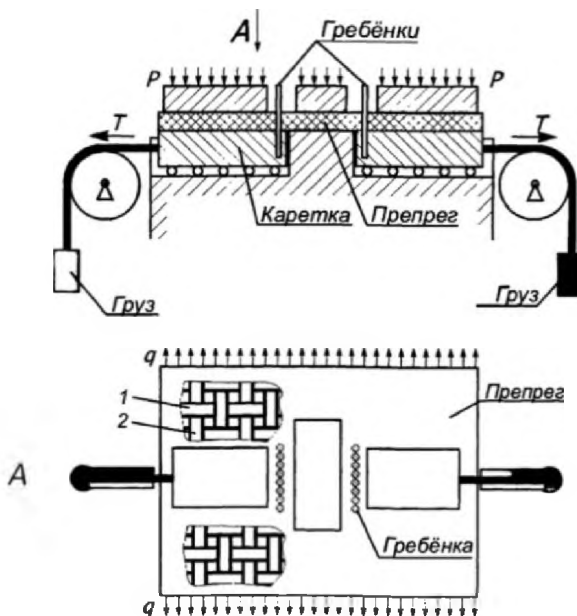


Рис. 3.1. Схема нагружения тканого препрега:
1 – основа ткани; 2 – уток

В этом случае нити первого семейства только растягиваются, а нити второго семейства кроме растяжения по оси Oy силами Q ,

еще и сжимаются в поперечном направлении по оси Ox силами T . Следовательно, связь между семействами нитей, осуществляемая посредством сил трения скольжения, согласно выражениям (2.56), будет выражаться одним из равенств

$$\tau_{12}^{np} = k_{11}\sigma_{11} + k_{12}q + \mu_1 p \quad , \quad (3.1)$$

$$\tau_{21}^{np} = k_{21}q + k_{22}\sigma_{22} + \mu_2 p \quad .$$

Нагруженный таким образом тканый препрег будет находиться в плоском напряженном состоянии, поэтому возьмем на расстоянии x от начала координат один слой тканого препрега длиной dx (рис. 3.2) и рассмотрим равновесие каждого семейства нитей в отдельности. Далее предполагаем, что ось Ox расположена вдоль нитей основы.

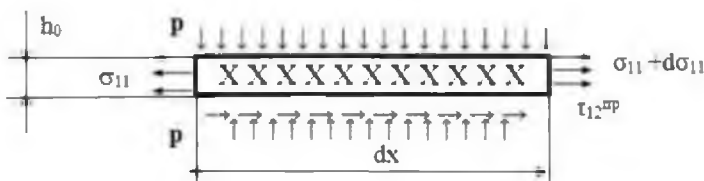


Рис. 3.2. Равновесие вырезанного элемента тканого препрега в направлении первого семейства нитей

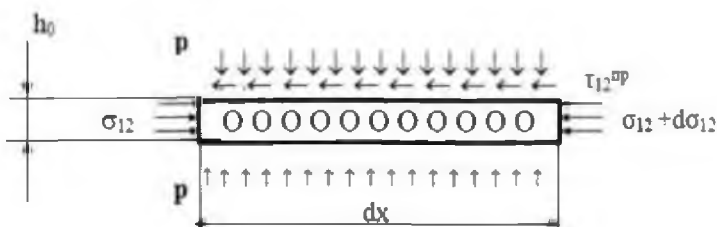


Рис. 3.3. Равновесие вырезанного элемента тканого препрега в направлении второго семейства нитей

Сумма всех сил на ось Ox равна нулю. Таким образом

$$h_0 \left(-\sigma_{11} + (\sigma_{11} + d\sigma_{11}) \right) + \tau_{12}^{np} dx = 0, \quad (3.2)$$

$$h_0 \left(\sigma_{12} - (\sigma_{12} + d\sigma_{12}) \right) - \tau_{12}^{np} dx = 0,$$

где h_0 – толщина слоя тканого препрега, σ_{12} – напряжение сжатия в поперечном направлении нитей утка. Решение системы дифференциальных уравнений (3.2) с учетом выражений (3.1) и граничных условий

$$\sigma_{11}|_{x=0} = \sigma_0, \quad \sigma_{12}|_{x=0} = \sigma_0, \quad (3.3)$$

имеет вид

$$\sigma_{11} = \sigma_{12} = \left(\sigma_0 + \frac{a_2}{a_1} \right) e^{-a_1 x} - \frac{a_2}{a_1}. \quad (3.4)$$

Здесь

$$a_1 = \frac{k_{11}}{h_0}, \quad a_2 = \frac{k_{12}}{h_0} q + \frac{\mu_1}{h_0} p. \quad (3.5)$$

Очевидно, что граница зоны $x = x_0$, где под действием внешней нагрузки происходит смещение со скольжением второго семейства нитей относительно первого, может быть определена из условия предсдвигового состояния

$$\sigma_{11}|_{x=x_0} = \sigma_{01},$$

после подстановки которого в уравнение (3.4) находим

$$x_0 = \frac{1}{a_1} \ln \frac{a_1 \sigma_0 + a_2}{a_1 \sigma_{01} + a_2}. \quad (3.6)$$

Обозначим через Δ_1 – удлинение нитей первого семейства вдоль оси Ox , а через Δ_2 – величину уплотнения второго семейства нитей. Тогда перемещение гребенки Δ_{11} будет равно

$$\Delta_{11} = \Delta_1 + \Delta_2 = \int_0^{x_0} \left(\gamma_{11} + \frac{\sigma_{11}}{E_{11}} \right) dx + \int_0^{x_0} \left(\gamma_{12} + \frac{\sigma_{12}}{E_{12}} \right) dx .$$

Интегрируя предыдущее равенство с учетом выражений (3.4) – (3.6) и, делая преобразования, получим

$$\Delta_{11} = \left(c_3 - c_4 \frac{a_2}{a_1} \right) \left(\ln \left(1 + \sigma_0 \frac{a_1}{a_2} \right) - \ln 2 \right) + c_4 \left(\sigma_0 - \frac{a_2}{a_1} \right) . \quad (3.7)$$

В равенстве (3.7) под параметрами $c_1 - c_4$ следует понимать

$$c_1 = \frac{\mu_1}{k_{11}}; \quad c_2 = \frac{k_{12}}{k_{11}}; \quad c_3 = \frac{\gamma_0^1 h_0}{k_{11}}; \quad c_4 = \frac{a_0^1 h_0}{k_{11}}; \quad (3.8)$$

$$\gamma_0^1 = \gamma_{11} + \gamma_{12}; \quad a_0^1 = \frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{12}}; \quad \frac{a_2}{a_1} = c_2 q .$$

Выражение (3.7) устанавливает связь между внешней нагрузкой и соответствующими перемещениями семейств нитей тканого препрега. Зависимость (3.7) в совокупности определяет четыре параметра $c_1 - c_4$, которые с помощью соотношений (3.8) однозначно выражаются через восемь ранее названных характеристик препрега

$$\mu_1, \quad k_{11}, \quad k_{12}, \quad \gamma_{11}, \quad \gamma_{12}, \quad E_{11}, \quad E_{12}, \quad \sigma_{01} . \quad (3.9)$$

3.3. Постоянные упругости и относительные необратимые удлинения при растяжении

Для определения численных значений параметров (3.9) проводятся работы по указанным ранее видам испытаний тканого препрега в направлении основы. На первом этапе исследований определяются две характеристики препрега: γ_{11} и E_{11} . Для этого проводятся испытания на растяжение образцов в виде полосок шириной 25 мм в рабочей части и длиной 100 мм. Схема нагружения такой полоски показана на рис. 3.4.

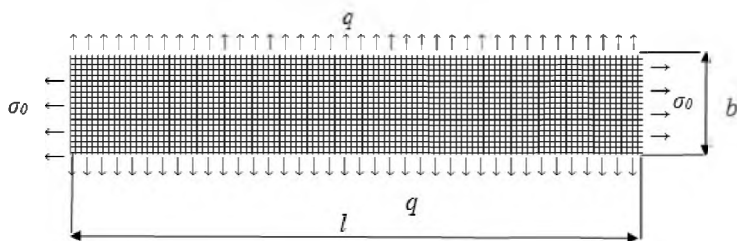


Рис. 3.4. Схема нагружения ткани при испытаниях на растяжение

Для устранения нежелательных последствий, к которым могут привести граничные условия на продольных сторонах образца, проводится простое дуосное испытание. Вначале полоска растягивается небольшими поперечными усилиями Q (для распрямления) и защемляется по продольным сторонам. Измеряется удлинение полоски после нагружения ее усилиями T .

Как известно (см. зависимость (2.28)), между удлинениями полосок и нагрузками при испытаниях имеет место приближенная зависимость

$$(W_i)_k = \gamma_{kk} l + \frac{(T_i)_k}{h_0 b (EF)_{kk}} l, \quad (3.10)$$

где b – ширина; l – длина, а h_0 – толщина рабочей части полоски. При $k=1$ определяются характеристики препрега в направлении основы, а при $k=2$ – в направлении утка.

Такие исследования проведены на образцах, изготовленных на основе стеклоткани Т-13 (ГОСТ-19170), имеющей толщину $h_0 = 0,25$ мм. Удлинения полосок W_i , полученные при нагружении их силами T_i , приведены в таблице 3.1. Каждый вид испытаний выполнялся 10 раз, разброс результатов испытаний составил не более 12%. Обработка результатов испытаний проводилась по методу наименьших квадратов.

Таблица 3.1

Удлинения W_i полосок (25 мм · 100 мм) из стеклоткани Т-13 при растяжении их силой T_i

T_j , кГс	W_{i1} , мм	W_{i2} , мм	W_{i3} , мм	W_{i4} , мм	W_{i5} , мм	W_{i6} , мм	W_{i7} , мм	W_{i8} , мм	W_{i9} , мм	W_{i10} , мм
Ткань Т-13 (основа), $Q = 5\text{кГс}$										
30	0,59	0,60	0,60	0,61	0,59	0,59	0,60	0,61	0,59	0,60
60	1,08	0,91	0,82	0,84	0,90	0,82	0,85	0,86	0,90	0,82
90	1,27	1,09	1,10	1,11	1,12	1,10	1,09	1,05	1,04	1,02
120	1,50	1,31	1,29	1,30	1,31	1,52	1,29	1,28	1,30	1,29
150	1,60	1,58	1,52	1,60	1,68	1,69	1,70	1,71	1,68	1,67
180	1,90	1,82	1,85	1,86	1,90	1,91	1,92	1,89	1,88	1,91
210	2,10	2,09	2,08	2,11	2,12	2,08	2,10	2,11	2,09	2,09
Ткань Т-13 (угол), $Q = 5\text{кГс}$										
30	0,30	0,31	0,29	0,32	0,26	0,31	0,27	0,30	0,26	0,28
60	0,58	0,57	0,50	0,42	0,51	0,49	0,50	0,43	0,45	0,44
90	0,81	0,75	0,70	0,72	0,67	0,78	0,80	0,81	0,78	0,79
120	1,11	1,10	1,05	0,98	1,01	1,22	0,95	0,96	1,01	0,96

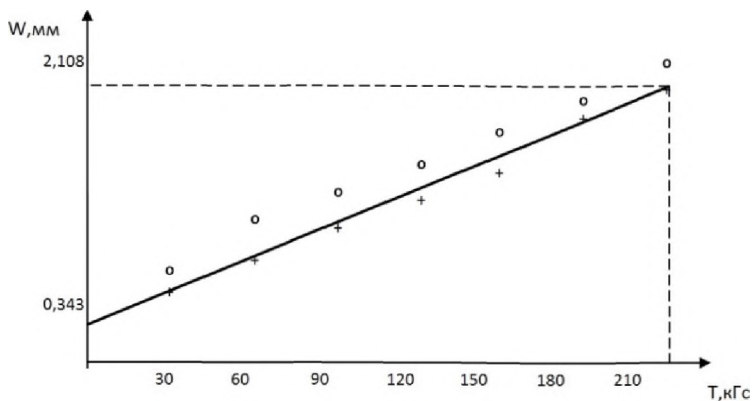


Рис. 3.5. Графическое изображение осевого удлинения полоски ткани Т-13 по результатам испытаний и по расчетной формуле (3.10)

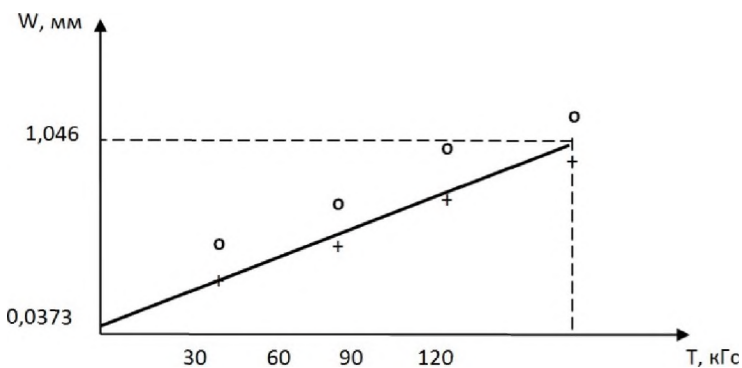


Рис. 3.6. Графическое изображение уточного удлинения полоски ткани Т-13 по результатам испытаний и по расчетной формуле (3.10)

На графиках (рис. 3.5 и рис. 3.6) показаны результаты вычисления удлинения полоски ткани Т-13 по формуле (3.10). Знаком «o» отмечены максимальные значения удлинений при испытаниях, знаком «+» – минимальные.

3.4. Коэффициенты трения у препрегов из тканей гладкого переплетения

Приборы, которые использовались при проведении всех испытаний, прошли государственную поверку в установленном порядке.

Пусть проводится испытание, заключающееся в вытягивании нити из препрега. При этом нить перерезается на расстоянии $s = s_0$ от края образца и к ее концу прикладывается вытягивающая сила T . Поверхности препрега с двух сторон ограничены жесткими плоскостями и сжаты давлением p . Препрег состоит из трех слоев тканого материала. Перерезанная нить находится в среднем слое ткани. Нагруженная нить сдвигается со смещением. Максимальное значение нагрузки T фиксируется.

Между вытягиваемой нитью и другими семействами нитей возникает сила трения скольжения, которая может принимать значения от нуля до τ^{np} . Обозначим через $\sigma = \sigma(s)$ напряжения, возникающие в нити при ее вытягивании. Для определения напряжения в нити можно воспользоваться первым уравнением (3.2).

Между препрегами из тканей гладкого переплетения и препрегами из мультиаксиальных тканей имеются некоторые различия, влияющие на величину силы трения. На этом основании вначале дадим решение первого уравнения (3.2) для препрегов, армированных тканями гладкого переплетения. В рассматриваемом случае средний слой ткани должен быть растянут поперечными усилиями q , обеспечивающими натяжение поперечных нитей. Следовательно, предельные значения сил трения на основании зависимостей (2.43) определяются равенством

$$\tau^{np} = k_{11}\sigma + k_{12}q + \mu_1 p. \quad (3.11)$$

Решение первого уравнения (3.2) с учетом выражения (3.11) и граничного условия

$$\sigma|_{s=0} = \sigma_0,$$

имеет вид

$$\sigma = \left(\sigma_0 + \frac{a_2}{a_1} \right) e^{-a_1 s} - \frac{a_2}{a_1}. \quad (3.12)$$

Здесь

$$a_1 = \frac{k_{11}}{h_0}, \quad a_2 = \frac{k_{12}}{h_0} q + \frac{\mu_1}{h_0} p.$$

Прежде чем перейти к дальнейшим исследованиям, обратим внимание на следующие обстоятельства. Давление p в формуле (3.12) и других формулах для тканей гладкого переплетения фактически состоит из суммы двух давлений – это внешнее давление p_1 и внутреннее давление p_{01} , которое формируется при ткачестве ткани. Причину существования давления p_{01} можно объяснить двумя факторами: изгибом нитей и существованием небольшой растягивающей силы в нитях. При отсутствии такого давления ткань не могла бы существовать как единое целое. Она распалась бы на отдельные элементы – нити. Давление p_{01} играет существенную роль, когда внешнее давление отсутствует. Однако, учитывая малость давления p_{01} при присутствии внешнего давления для упрощения исследования добавкой p_{01} можно пренебречь, поэтому в дальнейшем будем считать, что внешнее давление достигает своего минимума равного p_{01} .

Определим исходные данные, зафиксируем результаты испытаний и обозначим через них параметры, используемые в зависимостях (3.12). К испытаниям привлекается полоса ткани шириной $b = 40$ мм и длиной $l = 500$ мм. Размеры полосы выбраны из условия отсутствия их влияния на результаты испытаний. Такая полоса из ткани Т-13 на ширине $b = 40$ мм содержит 64 нити основы или 40 нитей утка, ее толщина $h_1 = 0,27$ мм. На расстоянии s_0 от края образца перерезается нить. Далее при вытаскивании этой нити из полосы ткани фиксируется максимальная нагрузка T . На рис. 3.7 показана фотография образца в момент вытаскивания нити.



Рис. 3.7. Образец ткани в момент испытания при вытаскивании нити

В соответствии с принятыми обозначениями параметры σ_0 , q и p вычисляются следующим образом

$$\sigma_0 = \frac{Tm}{bh_1}, p = \frac{P}{bl}, q = \frac{Q}{lh_1}, \quad (3.13)$$

где m – количество нитей, расположенных в ткани шириной b ; P – сила, сдавливающая полоску стеклоткани размером $b \times l$; Q – сила, растягивающая полоску ткани длиной l и толщиной h_1 в поперечном направлении.

Были проведены испытания на полоске ткани Т-13 для разных длин нитей. Каждый вид испытаний повторялся 5 раз. Как видно из данных, приведенных в таблице 3.2, следует, что разброс результатов испытаний от среднего значения составляет не более 10 %. Данные по испытаниям для нитей основы и утка при различных значениях нагрузки P и Q содержатся в таблице 3.2.

По результатам каждого вида испытаний определялось среднее значение из T_i – результатов замеров максимальных усилий при выдергивании нити. Полученные данные вместе с результатами

расчетов по формулам (3.3) – (3.5) были использованы для вычисления неизвестных параметров σ_{00} , p_{01} , k_{11} , k_{12} , и μ_1 путем составления системы линейных уравнений.

Таблица 3.2

Зависимость силы вытягивания нитей T_i из полосок ($b = 40$ мм) стеклоткани Т-13 от длины нитей s_0 и величины внешней нагрузки P и Q

№ эксп.	s_0 , мм	Ткань Т- 13 (основа)					Ткань Т- 13 (уток)				
		T_{i1}, H	T_{i2}, H	T_{i3}, H	T_{i4}, H	T_{i5}, H	T_{i1}, H	T_{i2}, H	T_{i3}, H	T_{i4}, H	T_{i5}, H
$P = 0, Q = 0$											
1	100	3,7	3,9	4,0	4,0	4,2	2,4	2,2	2,4	2,3	2,5
2	200	6,7	6,6	6,2	6,5	6,1	4,6	4,8	4,5	4,8	4,6
3	250	8,2	8,0	8,2	8,8	8,4	5,8	5,0	5,4	5,2	5,4
4	300	11,2	10,6	12,0	10,8	11,0	6,6	5,8	6,0	6,2	6,1
5	400	14,0	16,0	14,2	16,0	15,2	9,2	10,4	9,2	9,2	9,0
$P = 0, Q = 150 H$											
6	100	8,2	8,5	8,4	8,2	8,3	6,7	6,8	6,6	6,9	6,9
7	250	19,0	19,2	20,2	19,0	19,0	16,5	16,2	16,0	16,0	15,8
$P = 150 H, Q = 0$											
8	100	18,5	18,7	18,3	18,6	18,4	19,6	20,3	19,8	19,9	19,7
9	250	55,0	52,5	53,0	54,5	54,0	46,0	45,5	47,5	48,0	48,6

Для величин σ_0 и s_0 , полученных в результате i – го испытания, введем обозначения σ_0^i и s_0^i . При этом, если $p = p_{01}$ и $q = 0$, напряжение $\sigma|_{s=s_0}$ положим равным σ_{00} , не исключая при этом, что $\sigma_{00} = 0$, так как в точке $s = s_0$ сделан разрез нити. В результате после подстановки этих данных в формулу (3.12) найдем

$$a_1 s_0^i = \ln \frac{\sigma_0^i + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}}{\sigma_{00} + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}}.$$

Получена расчетная формула для определения неизвестных постоянных. Отсюда, учитывая, что $s_0^4 - s_0^1 = s_0^5 - s_0^2$, получим

$$\frac{\sigma_0^1 + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}}{\sigma_0^4 + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}} = \frac{\sigma_0^2 + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}}{\sigma_0^5 + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}}.$$

Таким образом

$$\frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01} = \frac{\sigma_0^1 \sigma_0^5 - \sigma_0^2 \sigma_0^4}{\sigma_0^2 + \sigma_0^4 - \sigma_0^1 - \sigma_0^5} = b_1. \quad (3.14)$$

Из условия

$$a_1 (s_0^4 - s_0^1) = \ln \frac{\sigma_0^4 + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}}{\sigma_0^1 + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}},$$

найдем k_{11}

$$k_{11} = \frac{h_1}{(s_0^4 - s_0^1)} \ln \frac{\sigma_0^4 + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}}{\sigma_0^1 + \frac{\mu_1}{k_{11}} p_{01}}. \quad (3.15)$$

Рассмотрим результаты испытаний № 6 и № 7. Тогда на основании зависимости (3.12) получим

$$\frac{\sigma_0^6 + \frac{k_{12}}{k_{11}}q + \frac{\mu_1}{k_{11}}p_{01}}{\sigma_0^7 + \frac{k_{12}}{k_{11}}q + \frac{\mu_1}{k_{11}}p_{01}} = b_2,$$

где $b_2 = \exp\left[a_1(s_0^6 - s_0^7)\right]$.

В представленном соотношении неизвестным является только параметр k_{12} . Отсюда

$$k_{12} = \frac{k_{11}}{q} \left[\frac{\sigma_0^6 - b_2\sigma_0^7}{b_2 - 1} - \frac{\mu_1}{k_{11}}p_{01} \right]. \quad (3.16)$$

Аналогично найдем

$$\frac{\mu_1}{k_{11}}p = \frac{\sigma_0^8 - b_3\sigma_0^9}{b_3 - 1} = b_4.$$

Здесь $b_3 = \exp\left[a_1(s_0^8 - s_0^9)\right]$. Сравнение (3.14) с предыдущим равенством дает возможность найти p_{01} и μ_1

$$p_{01} = \frac{b_1}{b_4}p, \quad \mu_1 = k_{11} \frac{b_4}{p}. \quad (3.17)$$

При вычислении параметров k_{11} , k_{12} , p_{01} и μ_1 было исключено из расчетных формул неизвестное пока напряжение σ_{01} . Найдем величину этого напряжения при $q=0$ и $p=p_{01}$. Пусть в этом случае $\sigma_{01} = \sigma_{00}$. Тогда очевидно, что

$$\sigma_{00} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \left[\left(\sigma_0^i + \frac{\mu_1}{k_{11}}p_{01} \right) e^{-a_1 s_0^i} - \frac{\mu_1}{k_{11}}p_{01} \right].$$

Расчет каждого слагаемого из предыдущей формулы приведен в таблице 3.3; при этом необходимо пояснить, что рассматриваемые величины представляют собой значения напряжения σ_{01} при i -ом испытании.

Таблица 3.3
Результаты расчетов по формулам (3.7) – (3.11) для ткани Т-13

i	σ_{00} , МПа	p_{01} , МПа	k_{11} , б/р	k_{12} , б/р	μ_1 , б/р
основа	7,33	0,00183	0,000646	0,0161	16,102
уток	4,11	0,00140	0,000468	0,0140	8,31
$(\sigma_{00})_i$, МПа					
i	1	2	3	4	5
основа	8,79	6,23	6,58	8,79	6,23
уток	3,40	4,94	3,76	3,46	5,00

Анализ результатов испытаний ткани Т-13 (см. таблицу 3.2) показывает, что сила трения действительно имеет ощутимую зависимость от давления между слоями ткани и от усилий растяжения в нитях каждого семейства. Первое приближение такой зависимости может быть линейным. На этом основании выражения (2.56) для предельных сил трения приняты для выражения такой зависимости.

Изложим теперь второй способ нахождения коэффициентов k_{11} , k_{12} и μ_1 . Для этого вначале положим, что при испытаниях было принято $q=0$ и $p=0$. В таком случае из (3.12) найдем

$$\sigma_{00} = \sigma_0^i \cdot e^{-k_{11} \frac{s_i}{h_0}} \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Прологарифмируем последнее равенство

$$\ln \sigma_{00} = \ln \sigma_0^i - k_{11} \frac{s_i}{h_0}.$$

Из этого соотношения найдем

$$\ln \frac{\sigma_0^i}{\sigma_0^1} = k_{11} \frac{s_i - s_1}{h_0}, \quad (i = 2, 3, \dots, n).$$

Здесь неизвестным является параметр k_{11} . Для его нахождения применим метод наименьших квадратов для функции, зависящей от одного параметра. В результате найдем

$$k_{11} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \frac{h_0}{s_i - s_1} \ln \frac{\sigma_0^i}{\sigma_0^1}. \quad (3.18)$$

Считая коэффициент k_{11} найденным, определим параметр k_{12} , приняв при этом $q \neq 0$, $p = 0$. В результате, руководствуясь соотношением (3.12), найдем следующие рекуррентное соотношение

$$\sigma_{00} = \left(\sigma_0^i + \frac{k_{12}}{k_{11}} q_j \right) e^{-k_{11} \frac{s_i}{h_0}} - \frac{k_{12}}{k_{11}} q_j.$$

Отсюда найдем

$$k_{12} = \frac{k_{11} \frac{\sigma_0^{1j} e^{-k_{11} \frac{s_1}{h_0}} - \sigma_0^{ij} e^{-k_{11} \frac{s_i}{h_0}}}{q_j \frac{e^{-k_{11} \frac{s_i}{h_0}}}{e^{-k_{11} \frac{s_1}{h_0}} - e^{-k_{11} \frac{s_1}{h_0}}}}}{q_j \frac{e^{-k_{11} \frac{s_i}{h_0}}}{e^{-k_{11} \frac{s_1}{h_0}} - e^{-k_{11} \frac{s_1}{h_0}}}}.$$

Здесь $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$.

Далее применим метод наименьших квадратов и в результате найдем

$$k_{12} = \frac{k_{11}}{m(n-1)} \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_0^{1j} e^{-k_{11} \frac{s_1}{h_0}} - \sigma_0^{ij} e^{-k_{11} \frac{s_i}{h_0}}}{q_j \begin{pmatrix} e^{-k_{11} \frac{s_i}{h_0}} & -k_{11} \frac{s_1}{h_0} \\ e & -e^{-k_{11} \frac{s_1}{h_0}} \end{pmatrix}} \quad (3.19)$$

Аналогично, полагая $q = 0$, $p \neq 0$, найдем

$$\mu_1 = \frac{k_{11}}{m(n-1)} \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m \frac{\sigma_0^{1j} e^{-k_{11} \frac{s_1}{h_0}} - \sigma_0^{ij} e^{-k_{11} \frac{s_i}{h_0}}}{p_j \begin{pmatrix} e^{-k_{11} \frac{s_i}{h_0}} & -k_{11} \frac{s_1}{h_0} \\ e & -e^{-k_{11} \frac{s_1}{h_0}} \end{pmatrix}} \quad (3.20)$$

Второй способ нахождения коэффициентов k_{11} , k_{12} , μ_1 предполагает значительные экспериментальные исследования, связанные с большими материальными затратами. Однако проведенные экспериментальные исследования по первому варианту позволили авторам подтвердить теоретические исследования и убедиться в достоверности сделанных прогнозов и правильность выдвинутых гипотез. Более обширные исследования препрегов для набора статистики следует проводить вторым способом.

Проведены также аналогичные испытания угольной ткани 56313. К испытаниям привлекались полоски ткани длиной $l = 500$ мм, шириной $b = 40$ мм и толщиной 0,34 мм. Перед вырезанием таких полосок края промазывались клеем для обеспечения целостности образцов. В противном случае образцы ткани рассыпались на отдельные нити. Такая подвижность ткани, как показали дальнейшие испытания, объясняется значительно меньшими силами внутреннего трения по сравнению с тканью Т-13. Угольная ткань 56313 образована нитями путем полотняного переплетения (основная и уточные нити в ней чередуются через одну). Таким образом, с учетом одинакового количества нитей (24 шт.), расположенных на ширине 40 мм как в направлении основы, так и в направлении утка, можно сделать вывод о симметричности направлений основы и ут-

ка. На этом основании испытания проводились только для направления основы. Результаты испытаний приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Зависимость силы вытягивания нитей T_i из полосок
($b = 40$ мм) угольной ткани 56313 от длины нитей s_0
и величины внешней нагрузки P и Q

№ эксп.	s_0 , мм	T_{i1} , Н	T_{i2} , Н	T_{i3} , Н	T_{i4} , Н	T_{i5} , Н
$P = 0, Q = 0$						
1	100	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
2	200	0,9	1,0	1,1	0,9	0,95
3	250	1,7	1,8	1,9	1,8	1,7
4	300	1,9	1,8	2,2	2,1	1,9
5	400	3,0	3,2	3,3	2,8	3,0
$P = 0, Q = 150$ Н						
6	100	1,6	1,8	2,0	2,1	1,6
7	250	4,0	4,4	4,2	4,1	4,3
$P = 150$ Н, $Q = 0$						
8	100	2,8	3,0	3,2	3,2	3,3
9	250	8,5	8,7	8,9	8,8	8,6

Результаты расчетов по данным таблицы 3.4 приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Результаты расчетов по формулам (3.14) – (3.20)
для угольной ткани 56313

σ_{00} , МПа	ρ_{01} , МПа	k_{11} , б/р	k_{12} , б/р	μ_1 , б/р
0,324	0,00248	0,00147	0,00038	0,4978
$(\sigma_{00})_i$, МПа				
0,3376	0,25	0,41	0,339	0,255

3.5. Результаты испытаний и расчетов по ним для тканей гладкого переплетения

Проведенный анализ полученных результатов испытаний и расчетных значений коэффициентов приводит к выводу, что растягивающие напряжения в семействах нитей по-разному влияют на касательные напряжения. Так, составляющая $k_{11}\sigma_{11}$ продольной силы трения скольжения τ_{12}^{np} и составляющая $k_{22}\sigma_{22}$ продольной силы трения скольжения τ_{21}^{np} практически равны нулю. Пренебрегая этими составляющими, получим другое представление формул (3.1), (3.4), (3.6) и (3.7), которые с учетом сказанного, примут следующий вид

$$\tau_{12}^{np} = k_{12}\sigma_{22} + \mu_1 p, \quad (3.21)$$

$$\tau_{21}^{np} = k_{21}\sigma_{11} + \mu_2 p.$$

$$\sigma_{11} = \sigma_{12} = \sigma_0 - \frac{k_{12}q}{h_0} x,$$

$$x_0 = \frac{h_0}{k_{12}q} \left(\sigma_0 - \sigma_{10} - \frac{\mu_1}{k_{11}p} \right), \quad (3.22)$$

$$\Delta_{11} = \left(\gamma_0^1 + a_0^1 \sigma_0 \right) x_0 - \frac{x_0^2}{2h_0} a_0^1 k_{12} q.$$

Здесь обозначения параметров имеют такой же смысл, как и в формулах (3.4) – (3.7). Проведенный в той же последовательности действий перерасчет всех характеристик препрега с использованием формул (3.21) показывает, что некоторое увеличение отдельных коэффициентов является результатом обнуления значений k_{11} и k_{22} , но в целом это не играет существенной роли. К таким же

выводам приходим, если проанализируем результаты испытаний и по другим стеклотканям гладкого переплетения (см. таблицы 3.6 – 3.12). Таким образом, сделанный ранее вывод о том, что для пропитанных стеклотканей гладкого переплетения в формулах (2.56) можно положить $k_{11} = k_{22} = 0$ является верным. Для других видов тканей необходимо подтвердить соответствующими экспериментами сделанное предположение. Предельные силы трения скольжения между семействами нитей в этом случае определяются по формулам (3.21).

Таблица 3.6

Значения коэффициентов внутреннего трения
для стеклоткани полотняного (1/1) плетения марки Т-13

№ п/п	Обозначения коэффициентов	Значения коэффициентов			
		По формулам (3.14) – (3.20)		По формулам (3.22)	
		основа	уток	основа	уток
1	2	3	4	5	6
1	k_{11}	0,000108	0,00066	0,000	0,000
2	k_{12}	0,026800	0,01500	0,0295	0,01858
3	μ_1	17,820	9,256	19,630	11,52
4	p_1 , МПа	0,0274	0,0191	0,0274	0,0191
5	γ_{11}	0,00343	0,000373	0,00343	0,000373
6	γ_{12}	0,0323	0,0381	0,0308	0,0405
7	E_{11} , МПа	19001	21145	19001	21145
8	E_{12} , МПа	421,0	506,7	345,8	408,6
9	σ_{01} , МПа	11,80	18,01	11,83	18,2

Таблица 3.7

**Значения коэффициентов внутреннего трения
для стеклоткани сатинового (8/3) плетения марки Т-11-ГВС-9**

№ п/п	Обозначения коэффициентов	Значения коэффициентов			
		По формулам (3.14) – (3.20)		По формулам (3.22)	
		основа	уток	основа	уток
1	k_{11}	0,000038	0,00013	0,000	0,000
2	k_{12}	0,027571	0,02303	0,0281	0,02465
3	μ_1	9,451	9,247	9,66	9,90
4	p_1 , МПа	0,0143	$0,0092 \cdot 10^{-2}$	0,0143	$0,0092 \cdot 10^{-2}$
5	γ_{11}	0,00141	0,002	0,00141	0,002
6	γ_{12}	0,0358	0,008	0,0369	0,007
7	E_{11} , МПа	20631	20689,6	20631	20689,6
8	E_{12} , МПа	948,9	289,9	929,3	271,8
9	σ_{01} , МПа	3,7	4,79	3,76	4,81

Таблица 3.8

**Значения коэффициентов внутреннего трения
для стеклотканисатинового (8/3) плетения марки Т-10-80**

№ п/п	Обозначения коэффициентов	Значения коэффициентов			
		По формулам (3.14) – (3.20)		По формулам (3.22)	
		основа	уток	основа	уток
1	k_{11}	0,000115	0,00029	0,000	0,000
2	k_{12}	0,009554	0,01330	0,0102	0,01536
3	μ_1	9,748	1,218	1,87	1,407
4	p_1 , МПа	1,0822	1,0511	1,0822	1,0511
5	γ_{11}	0,00183	0,002	0,00183	0,002
6	γ_{12}	0,0275	0,0153	0,0268	0,0157
7	E_{11} , МПа	21047	20422,0	21047	20422,0
8	E_{12} , МПа	2857,4	2054,2	2698,2	1868,6
9	σ_{01} , МПа	15	32	16	34

Таблица 3.9

Значения коэффициентов внутреннего трения
для стеклоткани полотняного (1/1) плетения марки Т-9-Т

№ п/п	Обозначения коэффициентов	Значения коэффициентов			
		По формулам (3.14) – (3.20)		По формулам (3.22)	
		основа	уток	основа	уток
1	k_{11}	0,000165	0,00003	0,000	0,000
2	k_{12}	0,006836	0,01400	0,0076	0,01433
3	μ_1	2,568	2,484	2,874	2,542
4	p_1 МПа	0,0371	0,0541	0,0371	0,0541
5	γ_{11}	0,00216	0,002	0,00216	0,002
6	γ_{12}	0,0144	0,028	0,0134	0,03
7	E_{11} , МПа	6343	15271,3	6343	15271,3
8	E_{12} , МПа	1074,6	1609,5	959,1	1576,1
9	σ_{01} , МПа	9,6	14,1	10,5	14,2

Таблица 3.10

Значения коэффициентов внутреннего трения
для стеклоткани сатинового (8/3) плетения марки ТСУ 8/3-ВМП-78

№ п/п	Обозначения коэффициентов	Значения коэффициентов			
		По формулам (3.14) – (3.20)		По формулам (3.22)	
		основа	уток	основа	уток
1	k_{11}	0,000032	0,00011	0,000	0,000
2	k_{12}	0,021889	0,0275	0,0222	0,0289
3	μ_1	1,879	2,685	1,906	2,826
4	p_1 МПа	0,3879	0,2772	0,3879	0,2772
5	γ_{11}	0,00199	0,00188	0,00199	0,00188
6	γ_{12}	0,0237	0,018	0,024	0,0178
7	E_{11} , МПа	20266	22119	20266	22119
8	E_{12} , МПа	2923	1867	2889	1784
9	σ_{01} , МПа	27,8	37,5	28,2	37,9

Таблица 3.11

Значения коэффициентов внутреннего трения для стеклоткани
полотняного (1/1) плетения марки ТТ-СВМ

№ п/п	Обозначения коэффициентов	Значения коэффициентов			
		По формулам (3.14) – (3.20)		По формулам (3.22)	
		основа	уток	основа	уток
1	k_{11}	0,000124	0,000043	0,000	0,000
2	k_{12}	0,00924	0,0098	0,01028	0,0102
3	μ_1	2,001	0,644	2,226	0,667
4	p_1 МПа	0,1475	0,1688	0,1475	0,1688
5	γ_{11}	0,00275	0,00145	0,00275	0,00145
6	γ_{12}	0,02	0,0175	0,0191	0,0198
7	E_{11} , МПа	34483	29850	34483	29850
8	E_{12} , МПа	2537	3606	2309	3503
9	σ_{01} , МПа	10,9	33,3	11,7	33,3

Таблица 3.12.

Значения коэффициентов внутреннего трения для стеклоткани
полотняного (1/1) плетения марки Э 3/1-100П-95

№ п/п	Обозначения ко- эффициентов	Значения коэффициентов			
		По формулам (3.14) – (3.20)		По формулам (3.22)	
		основа	уток	основа	уток
1	k_{11}	0,000135	0,000078	0,000	0,000
2	k_{12}	0,00490	0,0060	0,00569	0,0065
3	μ_1	1,125	1,550	1,305	1,690
4	p_1 МПа	0,1522	0,1311	0,1522	0,1311
5	γ_{11}	0,00191	0,00209	0,00191	0,00209
6	γ_{12}	0,0153	0,0254	0,0144	0,0268
7	E_{11} , МПа	12868	13178	12868	13178
8	E_{12} , МПа	4658	2217	4065	2049
9	σ_{01} , МПа	33,6	33,0	33,8	33,2

3.6. Методика нахождения напряжения в нити

Анализ таблиц 3.3 и 3.5 и результата расчетов по формуле (3.20) показывает, что напряжение σ_{01} в пограничной точке нельзя считать равным нулю (погрешность вычислений этого параметра намного меньше его среднего значения), хотя, на первый взгляд, это напряжение все-таки должно быть равным нулю, так как оно вычисляется в точке, где нить разрезана. Такой парадокс можно объяснить путем согласования его с понятием предсдвигового состояния в точке разреза.

Пусть нить имеет достаточно большую длину. Если конец этой нити нагрузить растягивающей нагрузкой σ_0 , то на какой-то длине во всех ее точках произойдет сдвиг со смещением. Другие точки нити будут находиться или в упругом равновесии или в состоянии покоя. Таким образом, между этими множествами существует граничная точка. Пусть в этой точке напряжение в нити равно σ_{01} , которое назовем предсдвиговым напряжением. Очевидно, напряжение σ_{01} в некоторой мере зависит от давления p и натяжения q нитей второго семейства. Непрерывное увеличение напряжения σ_0 приведет к тому, что граничная точка совпадет с координатой $s = s_0$. Следовательно, мы попадаем в точку $s = s_0$, где произведен разрез нити, который фиксирует конец предсдвигового состояния. Ответ на поставленный вопрос будет таким – напряжение σ_0 должно быть таким, чтобы в точке разреза нити $s = s_0$ напряжения в нити были равными σ_{01} . Здесь правомочно провести сравнение с поведением функции в точке разрыва: односторонний предел и значение функции в точке разрыва могут не совпадать. Для напряжения σ_0 точка $s = s_0$ является точкой разрыва. Разрез служит только для фиксирования максимальной силы T в эксперименте. Другими словами, если бы не было разреза, то под действием максимальной силы T сдвиг со смещением остановился бы в точке $s = s_0$. При этом в точках, где $s > s_0$ имеет место упругий сдвиг.

Для отыскания напряжений в нитях вырежем элемент одного слоя нитей длиной $ds = R_1 d\psi$, где R_1 – радиус кривизны линии, на

которой расположены рассматриваемые нити, $d\psi$ - угловой размер дуги ds . Если препрег состоит из нескольких слоев ткани гладкого переплетения, то вырезанный элемент представляет собой нити только одного семейства. Толщина такого элемента h_1 представляет собой либо толщину слоя однонаправленных нитей, либо толщину слоя ткани гладкого переплетения. Пусть ширина такого элемента равна b . Утраченные связи заменим усилиями растяжения \bar{T} и $\bar{T} + d\bar{T}$, и силой трения скольжения \bar{F} . Основной признак установления направления силы \bar{F} заключается в том, чтобы направлять ее по касательной к нитям в сторону противоположную перемещению нитей (см. рис. 3.8). В нашем случае положительное направление определяется движением точки справа налево.

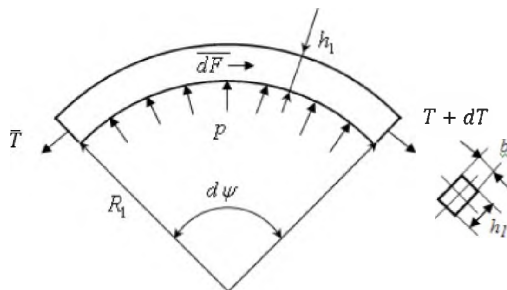


Рис. 3.8. Схема равновесия семейства нитей препрега

В случае равновесия рассматриваемого элемента препрега приравняем нулю проекцию всех сил на направление длины s и перпендикулярное ему. В результате получим

$$T - dT - T - dF = 0, \tag{3.23}$$

$$-(T + T + dT) \sin(0,5 d\psi) - pbR_1 d\psi = 0.$$

Силовые факторы в равенствах всегда положительны (нити могут только растягиваться, а движение всех точек нити осуществляется только в одну сторону) и зависят от соответствующих напря-

жений. Причем зависимости этих силовых факторов от напряжений выражаются следующим образом

$$T = \sigma h_1 b,$$

$$dT = d\sigma h_1 b,$$

$$dF = \tau b ds.$$

Здесь τ – предельное значение удельной силы трения, малейшее увеличение которой приводит к сдвигу нити. Подставим эти выражения в равенства (3.23). Тогда, с учетом того, что $d\psi$ – малая величина, получим

$$\frac{d\sigma}{ds} + \frac{\tau}{h_1} = 0, \tag{3.24}$$

$$\sigma = \frac{pR_1}{h_1}.$$

Отметим, что первые уравнения из систем (3.2) и (3.24) совпадают. Таким образом, напряжения в нитях не зависят от кривизны поверхности, на которой они расположены.

Дифференциальные уравнения (3.24) решаются совместно с краевыми условиями

$$u|_{s=0} = u_1^0, \quad u|_{s=\infty} = 0, \tag{3.25}$$

где u_1^0 – перемещение нити, вызванное нагрузкой σ_{01} . Очевидно, здесь требуется согласование напряжений и перемещений, так как дифференциальное уравнение задано в напряжениях, а краевые условия – в перемещениях. Это легко сделать, поскольку перемещение u и деформация ε связаны зависимостью

$$\frac{du}{ds} = \varepsilon. \quad (3.26)$$

Для семейств нитей основы, выполненных из стеклянных волокон, можно воспользоваться законом Гука

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (3.27)$$

где E – модуль упругости при растяжении нитей.

В результате, на основании зависимостей (3.26), (3.27) дифференциальное уравнение (2.82) преобразуется к виду

$$\frac{d^2u}{ds^2} - \frac{1}{h_1 E} \tau = 0. \quad (3.28)$$

Таким образом, полученное дифференциальное уравнение (3.28) с учетом краевых условий (3.25) дает возможность найти решение поставленной задачи. Однако для нахождения такого решения необходимо установить функциональную зависимость для сил трения от напряжения в нитях и давления между слоями ткани. Отметим также, что уравнения (3.24) и (3.28) можно использовать для решения задач, в постановке которых применяются такие понятия как сдвиг со смещением или сдвиг без смещения (упругий сдвиг). Первые задачи относятся к препрегам, а вторые используются при постановке их для твердых упругих тел. Как в одном, так и в другом случаях, окончательное решение формируется путем установления способа нахождения сил сопротивления.

Для установления σ_{01} рассмотрим напряженное состояние прямолинейного участка нити, где отсутствует сдвиг со смещением. Для этого воспользуемся уравнением (3.28). В результате, с учетом того, что здесь можно положить

$$\tau = G\gamma = \mu_0 p\gamma; \quad u = \gamma \frac{h_1}{2}, \quad (3.29)$$

уравнение (3.28) преобразуем к виду

$$\frac{d^2u}{ds^2} + ku = 0, \quad (3.30)$$

где $k = \frac{2\mu_0 p}{h_1 E}$; G – модуль сдвига; γ – относительная деформация

сдвига. Отметим, что модуль сдвига G для препрегов принципиально другой по сравнению с той же характеристикой для твердых упругих тел. Модуль сдвига напрямую зависит от созданного давления между слоями. Чем больше давление, тем сильнее сцепление между слоями, так как одновременно расширяется поверхность соприкосновения слоев армирующего материала и поэтому увеличивается объем упругого деформирования. Такое обстоятельство повышает жесткость на сдвиг между слоями, даже если при этом отсутствует смещение. Упругий сдвиг тесно связан с понятием трения покоя, которое имеет прямую пропорциональную зависимость от давления [2]. В таком случае в первом приближении функциональная зависимость между модулем сдвига и давлением должна быть установлена в виде

$$G = \mu_0 p,$$

где μ_0 – некоторая постоянная, зависящая от состояния соприкасающихся поверхностей. Методика определения этой постоянной будет приведена ниже. Приведенные там соображения в некоторых случаях позволяют сделать достаточно точную оценку модуля сдвига для препрегов.

Разрешив дифференциальное уравнение (3.28), получим

$$u = c_1 e^{-ks} + c_2 e^s.$$

Здесь c_1 и c_2 – некоторые постоянные, причем $c_2 = 0$, так как

$$u|_{s=+\infty} = 0.$$

Воспользуемся равенствами (3.26), (3.27) и (3.28) для нахождения σ и τ . В результате найдем

$$u = c_1 e^{-ks},$$

$$\sigma = -Ekc_1 e^{-ks}, \quad (3.31)$$

$$\tau = -\frac{2p\mu_0}{h_1} c_1 e^{-ks}.$$

Согласование полученных зависимостей с выражениями (3.11) и (3.12) в точке $s = s_0$ приводит к необходимости решения системы уравнений

$$\left(\sigma_0 + \frac{a_2}{a_1} \right) e^{-a_1 s_0} - \frac{a_2}{a_1} = -Ekc_1 e^{-ks_0} = \sigma_{01},$$

$$k_{11}\sigma_{01} + k_{12}q + \mu_1 p = -\frac{2p\mu_0}{h_1} c_1 e^{-ks_0}.$$

Из этой системы найдем, что

$$\mu_0 = \left(\frac{k_{11}\sigma_{01} + k_{12}q + \mu_1 p}{\sigma_{01}} \right)^2 \frac{E}{2p}.$$

Параметр μ_0 не должен зависеть ни от q ни от p , следовательно, полагая $q=0$, $p=p_{01}$, $\sigma_{01}=\sigma_{00}$, получим расчетную формулу для вычисления μ_0

$$\mu_0 = \left(\frac{k_{11}\sigma_{00} + \mu_1 p_{01}}{\sigma_{00}} \right)^2 \frac{E}{2p_{01}}. \quad (3.32)$$

В результате для напряжения σ_{01} получим следующее выражение

$$\sigma_{01} = \frac{k_{12}q + \mu_1 p}{\sqrt{\frac{2p\mu_0}{E} - k_{11}}}. \quad (3.33)$$

Как отмечалось ранее, напряжение σ_{01} на первый взгляд должно быть равным нулю ввиду того, что оно вычисляется в точке разреза нити. Экспериментальные исследования показали, что это не так. Объясним это противоречие, руководствуясь результатами эксперимента, а также теоретическими и экспериментальными исследованиями других авторов в разделе механики, изучающей силу трения [2 - 6]. При проведении эксперимента максимальная сила T зафиксирована при ее непрерывном увеличении. На этом этапе изменения силы отсутствовал сдвиг со смещением в точке разреза нити. Таким образом, в этот момент силу трения следует частично или полностью сравнивать с силой трения покоя. После сдвига на нить действует только сила трения скольжения. Разность между этими силами приводит к силе, которая объясняет появление в нити напряжения σ_{01} или наоборот: сила напряжения σ_{01} объясняет отличие силы трения покоя от силы трения скольжения.

3.7. Коэффициенты трения у препрегов из мультиаксиальных тканей

Функциональная зависимость для силы трения у мультиаксиальных тканей в условиях деформирования препрегов имеет вид (2.61)

$$\tau_i^{np} = \tau_i^0 + \mu_i p_i. \quad (3.34)$$

Здесь τ_i^0 и μ_i – параметры, подлежащие определению, причем τ_i^0 – предельное значение силы трения i -о слоя нитей мультиаксиальной ткани. Как и в случае армирования препрегов тканями гладкого переплетения, проведем испытание по выдергиванию нити из препрега и затем путем сравнения нагрузок и перемещений, полу-

ченных экспериментальным путем и вычисленных аналитически, определим искомые значения параметров τ_i^0 и μ_i . Если в оболочке все слои из мультиаксиальной ткани одинаковы, то для каждого слоя τ_i^0 и μ_i имеют одно и то же значение. Для определенности в зависимости (3.34) положим $i=1$.

Тканый препрег расположим между двумя жесткими поверхностями, создающими давление внутри препрега равное p . Перерезанную нить на расстоянии x_0 от края образца, вытягиваем силой T из ткани. Нагруженная таким образом нить сдвигается со смещением относительно других семейств нитей. Между вытягиваемой нитью и другими нитями возникает сила трения скольжения τ , которая может принимать значение от нуля до τ_1^{np} . В нагруженной нити возникают напряжения растяжения, которые можно вычислить, руководствуясь дифференциальным уравнением (3.13). Для этого подставим в (3.13) вместо силы трения τ ее предельное значение τ_1^{np} , определяемое зависимостью (3.34). В результате получим

$$\frac{d\sigma}{ds} + \frac{1}{h_1} (\tau_1^0 + \mu_1 p) = 0.$$

Решение этого уравнения с учетом граничного условия $\sigma|_{s=0} = \sigma_0$ имеет вид

$$\sigma = -\frac{1}{h_1} (\tau_1^0 + \mu_1 p) s + \sigma_0. \quad (3.35)$$

Представление (3.35) является той функциональной зависимостью между σ и s , с помощью которой можно производить ее сравнение с результатами экспериментальных исследований.

При проведении испытаний использовались образцы, вырезанные из биаксиальной ткани. Ширина такого образца составляет 40 мм, а длина – 250 мм. Направление длины образца совпадает с направлением испытываемого семейства нитей. Для испытаний бы-

ла выбрана биаксиальная ткань ВХ-470 . Слои нитей у такой ткани расположены под углом $\pm 45^\circ$. Толщина этой ткани $h = 0,52$ мм. Таким образом, толщина семейства однонаправленных нитей $h_1 = 0,26$ мм. Количество нитей в полосе шириной $b = 40$ мм равно 114 шт. Перед вырезом у отрезков края промазывались клеем, так как ткань очень подвижна и без этого невозможно сохранить целостность вырезанного образца. Учитывая симметричность расположения семейств нитей у ткани ВХ-470, испытаниям подвергался только один слой. Величины σ_0^{ij} , s_0^i ($i=1,2,3,4; j=0,1$) и p_i вычислялись по формулам (3.14). Здесь σ_0^{ij} является средним значением из пяти проведенных испытаний.

Предполагаем, как и в случае с тканями гладкого переплетения, что в точке разреза нити напряжение $\sigma|_{s=s_0} = \sigma_{01}$. В этом случае из (3.35) имеем расчетную формулу

$$\sigma_0^{ij} = \frac{1}{h_1} (\tau_1^0 + \mu_1 p_j) s_0^i + \sigma_{01}^j \quad (i=1,2,3,4; j=0,1). \quad (3.36)$$

Результаты проведенных испытаний представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13

Зависимость силы вытягивания нитей T_i
из полосок биаксиальной ткани ВХ-470

от длины нитей s_0^i и величины внешней нагрузки P

№ эксп	s_0^i , мм	T_{i1} , Н	T_{i2} , Н	T_{i3} , Н	T_{i4} , Н	T_{i5} , Н	T_{i1} , Н	T_{i2} , Н	T_{i3} , Н	T_{i4} , Н	T_{i5} , Н
		$P=0 (j=0)$					$P=150\text{Н} (j=1)$				
1	100	0,4	0,35	0,35	0,4	0,5	6,5	7,0	7,5	6,0	6,5
2	150	0,6	0,7	0,8	0,6	0,7	13,0	13,5	14,0	13,5	14,5
3	200	0,9	0,8	0,8	1,0	0,9	18,5	19,0	19,5	19,0	19,5
4	250	1,0	0,9	1,1	1,2	1,2	24,5	24,0	24,5	23,5	24,5

Пусть вначале $P = 0$. Путем вычитания правых и левых частей в соответствующих равенствах (3.36) исключим из рассмотрения напряжение σ_{01}

$$\sigma_0^{i0} - \sigma_0^{10} = \frac{\tau_1^0}{h_1} (s_0^i - s_0^1), \quad (i = 2, 3, 4).$$

Полученная формула позволяет найти напряжение τ_1^0 . Для этого воспользуемся методом наименьших квадратов. В результате найдем

$$\tau_1^0 = \frac{h_1}{3} \sum_{i=2}^4 \frac{\sigma_0^{i0} - \sigma_0^{10}}{s_0^i - s_0^1}. \quad (3.37)$$

Постоянную μ_1 определим тем же способом, используя данные испытаний при $P \neq 0$. Для этого расчетную формулу представим в виде

$$\sigma_0^{i1} - \sigma_0^{11} = \frac{\tau_1^0}{h_1} (s_0^i - s_0^1) + \frac{\mu_1}{h_1} p_1 (s_0^i - s_0^1).$$

Аналогично, используя предыдущую формулу и результаты испытаний, найдем

$$\mu_1 = \frac{1}{3p_1} \sum_{i=2}^4 \left(h_1 \frac{\sigma_0^{i1} - \sigma_0^{11}}{s_0^i - s_0^1} - \tau_1^0 \right). \quad (3.38)$$

Физический смысл напряжения τ_1^0 состоит в том, что это то сопротивление сдвигу нитей армирующего материала, которое обусловлено присутствием прошивной нити. Прошивная нить в какой-то мере способствует сжатию пакета нитей, в результате чего напряжение τ_1^0 можно считать как результат сжатия давлением p_{01} и поэтому имеем связь

$$\tau_1^0 = \mu_1 p_{01}.$$

Отсюда зная τ_1^0 и μ_1 , найдем давление p_{01} , которое своим присутствием в мультиаксиальной ткани обеспечивает ее целостность

$$p_{01} = \frac{\tau_1^0}{\mu_1}. \quad (3.39)$$

Для расчета минимального напряжения растяжения $\sigma_{00} = \sigma_{01} |_{p=0}$ воспользуемся зависимостям (3.36) и результатами испытаний № 1 – № 4 при $p = 0$

$$\sigma_{00} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left(\sigma_0^{i0} - \frac{\tau_1^0}{h_1} s_0^{i0} \right). \quad (3.40)$$

Здесь и в других расчетных формулах напряжения σ_0^{ij} рассчитаны по формулам (3.14) с использованием данных из таблицы 3.13 в виде средних значений из пяти однородных испытаний. Расчеты для биаксиальной ткани ВХ-470 по формулам (3.37) – (3.40) приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.14

Результаты расчетов по формулам (3.37) – (3.40)
для биаксиальной ткани ВХ-470.

σ_{00} , МПа	τ_1^0 , Па	μ_1 , б/р	p_{01} , МПа
1,05	0,0091	1,402	0,00649

Установим теперь функциональные зависимости для σ_{01} когда $p \neq 0$. Для этого приравняем это значение напряжения и силу трения их же значениям, определяемым по формулам (3.31)

$$\sigma_{01} = -Ekc_1 e^{-ks_0}, \quad (3.41)$$

$$\mu_1(p + p_{01}) = -\frac{2(-p + p_{01})}{h_1} c_1 e^{-ks_0}.$$

Для мультиаксиальных тканей в расчетных формулах (3.31) следует поменять давление p на $p + p_{01}$ и поэтому

$$k^2 = \frac{2\mu_0(p + p_{01})}{h_1^2 E}.$$

Из системы (3.41) найдем

$$\mu_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_1}{\sigma_{01}} \right)^2 E(p + p_{01}).$$

Параметр μ_0 не должен зависеть от p , следовательно, полагая в предыдущей формуле $p=0$, и, учитывая, что при $p=0$ $\sigma_{01} = \sigma_{00}$, найдем

$$\mu_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_1}{\sigma_{00}} \right)^2 E p_{01}.$$

В результате для σ_{01} имеем следующую зависимость

$$\sigma_{01} = \sigma_{00} \sqrt{\frac{p + p_{01}}{p_{01}}}. \quad (3.42)$$

3.8. Теоретические и экспериментальные исследования по определению неупругой составляющей при сжатии ткани

Исследуемые здесь препреги представляют собой слоистые композиты, армированные под углом $\pm\varphi_0$, т.е. не имеют регулярной структуры и, следовательно, обладают четко выраженной анизотропией каждого слоя. Такие препреги изготавливаются на основе тканей гладкого переплетения, либо с использованием мультиаксиальных тканей. Тканые материалы, являющиеся, в основном, двумерными структурами, проявляют хорошую стабильность свойств во взаимно-ортогональных направлениях основы и утка. Кроме того, тканые материалы характеризуются более сбалансированными свойствами в плоскости ткани. На этом основании, если рассматривать задачи, которые приводят к деформациям, не выходящим за рамки слоев, то такую систему можно рассматривать как плоскую. Это может служить оправданием применения в испытаниях плоских образцов, изготовленных из тканого материала.

Рассматривается задача об установлении неупругой составляющей сжатия ткани, которое осуществляется в ее плоскости. Отметим, что ввиду абсолютной гибкости нитей сжатие в обычном смысле в направлении нитей невозможно, так как оно приводит к потере устойчивости каркаса ткани. Существует и другой вид сжатия. Силы, осуществляющие такое сжатие, лежат в касательной плоскости к ткани и направлены поперек нитей. Такое сжатие может происходить, например, при изгибе цилиндрической оболочки в торовую, если эта оболочка находится в состоянии препрега, т.е. когда связующее еще не заполимеризовано, при проколе круглого отверстия. В результате армирующий материал такой оболочки имеет возможность сдвигаться на конечное расстояние без разрыва. Другим примером является сжатие, которое происходит при параллельном сдвиге нитей одного семейства относительно второго.

Как отмечалось, при сжатии 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. Второй этап сжатия характеризуется только упругими деформациями.

В какой-то мере упругий этап сжатия семейства нитей похож на сжатие упругого твердого тела. На этом основании можно руководствоваться построением линейных зависимостей между деформациями и напряжениями [7, 8]

$$\Delta W = \gamma + \gamma_1 P, \quad (3.43)$$

где γ и γ_1 — некоторые постоянные, причем γ отвечает за неупругое сжатие, а γ_1 — за упругое; ΔW — деформация; P — нагрузка.

Геометрическая интерпретация сделанных предположений представлена на рис. 3.9 [7, 8].

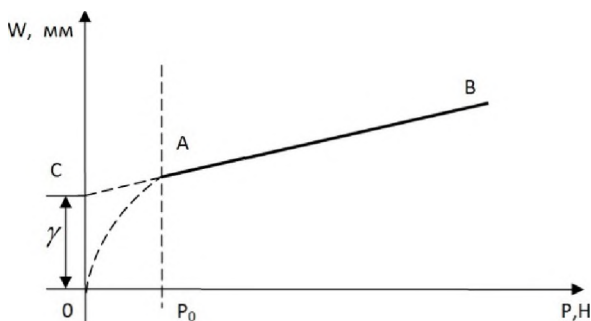


Рис. 3.9. Зависимость деформативности ткани от нагрузки

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 рис. 3.9

представляет собой неупругую составляющую и не зависит от изменения внутренних сил трения для одной и той же ткани. На этом основании для отыскания неупругой составляющей было сделано предположение о линейной зависимости (3.43) между деформациями и напряжениями. Линейное представление, очевидно, допускает на начальной стадии нагружения значительную погрешность. Однако в дальнейшем, когда неупругие деформации преодолены, описание деформативности с использованием линейной зависимости становится приемлемым. Более того, эта погрешность не влияет на точность нахождения неупругой составляющей деформации сжатия препрегов.

Анализ литературных источников [9 – 15] показал, что используются, в основном, 3 вида экспериментов для определения сдвиговых характеристик ткани (рис. 3.10): сдвиг при 2-х - оном нагружении (biaxial sheartest); испытания ткани на растяжение под углом (bias extension test) и испытание на сдвиг в шарнирной раме (shear frametest). Последнее испытание при сохранении ориентации нитей параллельно сторонам рамы позволяет определить чисто сдвиговую деформацию. На рис. 3.11, 3.12 показаны рамные устройства для проведения испытаний, конструктивное исполнение которых направлено на снижение влияния растяжения нитей на деформации сдвига [13, 16].

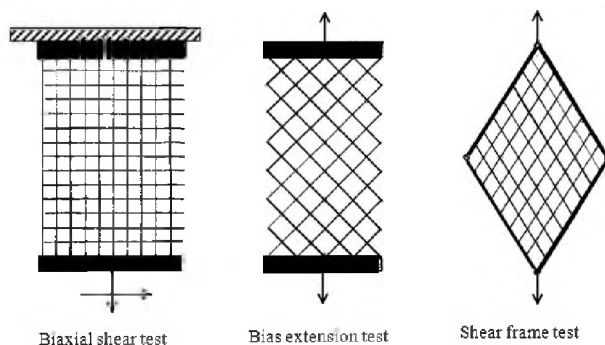


Рис. 3.10. Схемы испытания ткани на сдвиг

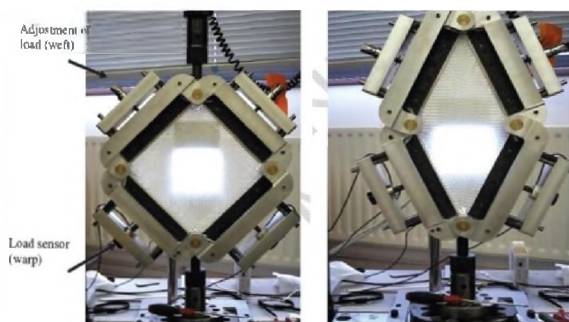


Рис. 3.11. Тип рамных устройств с замером [16]

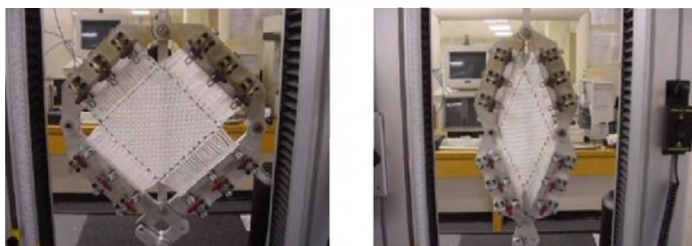


Рис. 3.12. Тип рамных устройств с регулированием натяжения нитей [13]

Типичная кривая деформирования при сдвиге рамы состоит из 3-х зон [12], рис. 3.13. В начале первой зоны нити основы и утка в месте контакта начинают поворачиваться друг относительно друга при весьма малой нагрузке. Глобальный сдвиг ткани происходит при смещении нитей, когда силы трения не способны обеспечить равновесие. Начало зоны 2 соответствует углу сдвига γ^* , при котором нити начинают входить в контакт с соседними и сжиматься в поперечном направлении. Этот угол можно рассматривать как предельный для целей трансформации. Начало зоны 3 характеризует полное смыкание нитей и соответственно, резкое увеличение усилия сдвига и сдвиговой жесткости за счет сдавливания нитей.

На практике в этой зоне в образце могут образоваться складки от потери устойчивости ткани.

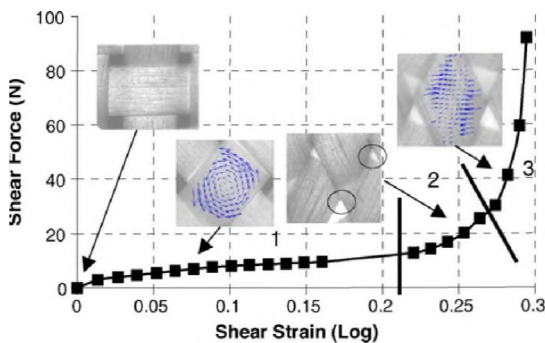


Рис. 3.13. Кривая деформирования [14]

Испытание ткани в шарнирной раме на сдвиг происходит по схеме, представленной на рис. 3.14. Угол сдвига по определению вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\lambda \quad (3.44)$$

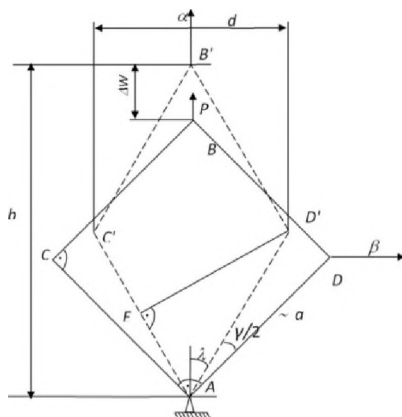


Рис. 3.14. Схема деформирования рамы при нагружении усилием P

При деформировании рамы, закрепленной в точке A под действием силы P , точка B перейдет в положение B' , сместившись на расстояние $BB' = \Delta W$. Если a – длина элемента рамы между центрами шарниров, то в исходном состоянии диагонали квадратной рамы равны

$$AB = CD = a\sqrt{2}.$$

В деформированном состоянии диагонали рамы равны

$$b = 2a \cos \lambda; \quad d = 2a \sin \lambda. \quad (3.45)$$

Очевидно

$$b = a \sqrt{2} + \Delta W.$$

Тогда

$$\cos \lambda = \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\Delta W}{2a}.$$

Угол сдвига

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2 \arccos \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\Delta W}{2a} \right). \quad (3.46)$$

Формулой (3.46) широко пользуются при обработке результатов эксперимента [9, 10]. Непосредственные замеры угла сдвига оптическими методами [10] показывает хорошую сходимость результатов с формулой (2.44).

Приведем очевидное ограничение на величину перемещений. Очевидно

$$\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\Delta W}{2a} \leq 1.$$

Отсюда

$$\frac{\Delta W}{a} \leq 2 - \sqrt{2} = 0,586.$$

Определим деформацию сдвига ε_{21} (изменение прямого угла CAD). Очевидно,

$$\varepsilon_{21} = \frac{D'E - a}{a},$$

где $D'E = a \sin 2\lambda$ (рис. 3.14). Тогда

$$\varepsilon_{21} = \sin 2\lambda - 1. \quad (3.47)$$

Соответственно, найдем относительные деформации осей

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{b}{a\sqrt{2}} - 1, \quad \varepsilon_{\beta} = \frac{d}{a\sqrt{2}} - 1.$$

Ортогональная ткань при испытании в квадратной раме ведет себя как биаксиальная с $\varphi = 45^\circ$, тогда

$$\varepsilon_{21} = (1 + \varepsilon_{\beta})(1 + \varepsilon_{\alpha}) = \frac{db}{2a^2} - 1. \quad (3.48)$$

Как и следовало ожидать, с учетом (3.43) формула (3.46) переходит в соотношение (3.47).

Для определения относительного неупругого сжатия разработан прибор, который представляет собой четырехзвенник в виде ромба. Образец ткани в виде ромба со сторонами параллельными семействам нитей защемяется по сторонам четырехзвенника. Нагрузка прикладывается к противоположным углам четырехзвенника.

При испытаниях образец удлиняется в направлении действия силы и укорачивается в перпендикулярном направлении, оставаясь все время ромбом. В результате уменьшается расстояние между па-

раллельными сторонами ромба, что приводит к сжатию семейств нитей. На рис. 3.15 показано нагружение образца.



Рис. 3.15. Фотография образца в момент нагружения

Предполагаем линейную зависимость перемещения ΔW от нагрузки P . Таким образом, должно быть справедливым соотношение (3.43). Постоянные γ и γ_1 найдем методом наименьших квадратов с использованием результатов проведенных испытаний.

$$m\gamma + \left(n \sum_{i=1}^m P_i \right) \gamma_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij}, \quad (3.49)$$

$$\left(n \sum_{i=1}^m P_i \right) \gamma + \left(n \sum_{i=1}^m P_i^2 \right) \gamma_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_i W_{ij}.$$

Это окончательный вид так называемой нормальной системы способа наименьших квадратов. Из этой системы находим γ и γ_1 , а затем подставляем их в эмпирическую формулу (3.43).

При испытаниях фиксируется усилие P , приложенное к рамке четырехзвенника и перемещение ΔW , которое равносильно изменению длины диагонали ромба. Результаты испытаний для ткани Т-33 представлены на диаграмме 3.16.

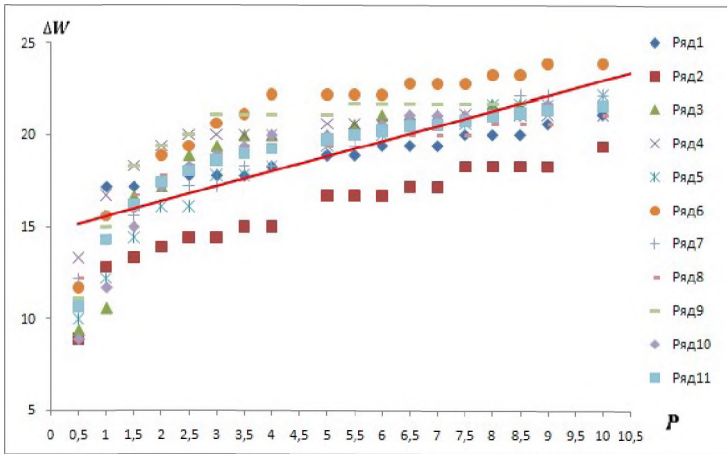


Рис. 3.16. Диаграмма зависимости перемещения ΔW при испытаниях ткани Т-33 от нагрузки P

Здесь принятые обозначения $\blacksquare \blacklozenge, \dots$ представляют собой точки с координатами $(P_i, \Delta W_{ij})$. Теоретическая зависимость результатов испытаний отождествляется с линейной зависимостью на том же рисунке.

Предполагая, что $\Delta W = \gamma$, установим следующие геометрические зависимости

$$\gamma_0 = \frac{\sin \varphi_0 - \sin \varphi}{\sin \varphi_0}, \quad (3.50)$$

$$2(a \cos \varphi_0 - a \cos \varphi) = \gamma,$$

где $2\varphi_0$ – угол между семействами нитей у образца до испытаний; 2φ – угол между семействами нитей у образца в результате деформации при испытаниях; a – длина стороны ромба у образца; γ – неупругое удлинение образца, установленное по результатам решения системы (3.49); γ_0 – относительная деформация при сжатии

образца ткани в направлении перпендикулярном к линии действия нагрузки.

В результате решения предыдущей системы получим

$$\gamma_0 = 2 \frac{\sin \varphi_0 - \sqrt{1 - \left(\cos \varphi_0 - \frac{\gamma}{2a} \right)^2}}{\sin \varphi_0} \quad (3.51)$$

Для ткани Т-33 расчеты по формулам (3.49), (3.51) показывают, что неупругое удлинение диагонали ромба равно $\gamma = 14,36$ мм. При этом длина стороны ромба составляла 140 мм. Относительная неупругая составляющая $\gamma_0 = 0,12$.

Проведенные исследования для ткани Т-33 позволяют сделать вывод о том, что такие же результаты можно получить и для любых тканей. Также можно ставить вопрос об установлении неупругой составляющей для мультиаксиальных тканей. Для подтверждения сказанного были проведены испытания биаксиальной ткани ВХ-470. Графическое изображение результатов испытаний представлено на диаграмме 3.17.

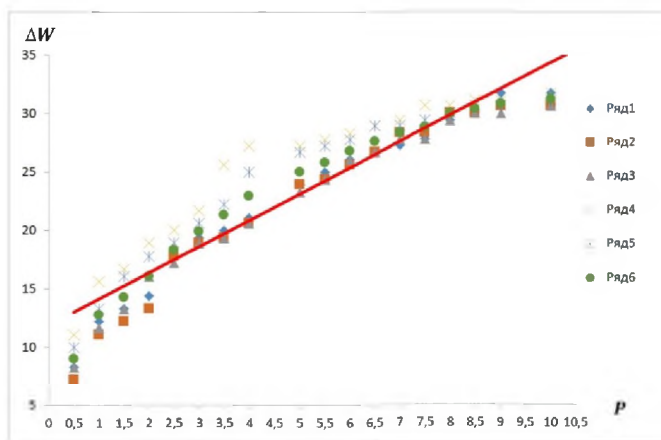


Рис. 3.17. Диаграмма зависимости перемещения ΔW при испытаниях биаксиальной ткани ВХ-470 от нагрузки P

Расчеты по формулам (3.49)–(3.51) показали, что

$$\gamma = 11,92 \text{ мм}, \gamma_0 = 0,10.$$

3.9. Влияние перекоса и эксцентриситета закрепления ткани в раме при испытании ее на сдвиг

Если концы образцов ткани закреплены по линии шарниров и нити основы и утка строго параллельны сторонам рамы, то в процессе нагружения длины нитей не меняются и растяжение – сжатие в них отсутствует. Вместе с тем нарушение этих условий приводит к возникновению усилий в нитях, которые, в свою очередь, могут изменить деформационные характеристики ткани при сдвиге. На это обстоятельство указывалось при обработке результатов испытаний по схеме «shearframe» в работах [13, 17].

Используя геометрический подход, определим влияние 2-х существенных факторов: - перекоса « β » ткани при закреплении в раму (рис. 3.18, а) и влияние эксцентриситета закрепления « δ » между внутренней кромкой рамки и осью, проходящей через центры шарниров (рис. 3.18, б). Расчетная схема учета влияния перекоса « β » приведена на рис. 3.18.

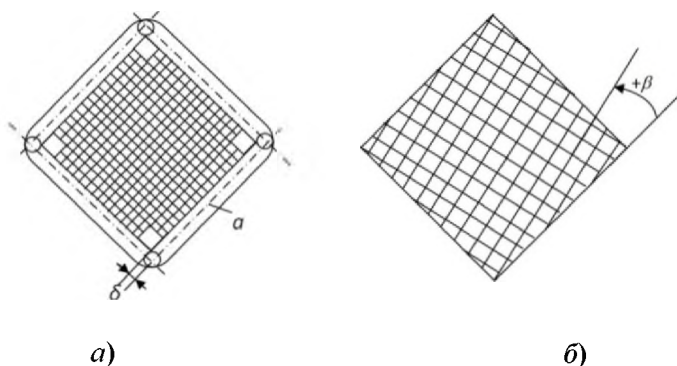


Рис. 3.18. Факторы, влияющие на деформации нитей при сдвиге:
а – перекос ткани; б – эксцентриситет рамы

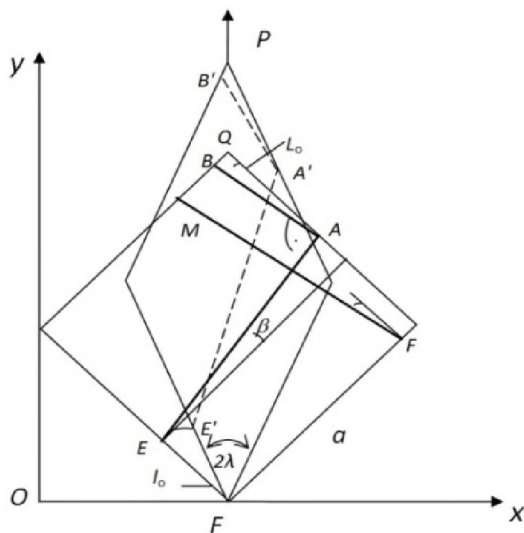


Рис. 3.19. Расчетная схема для определения влияния перекоса ткани на деформации нитей

Здесь на рисунке $l_0 = EF$; $L_0 = QA$.

В результате сдвига рамки под действие силы P нить EA с длиной $\alpha / \cos\beta$ заняла положение $E'A'$. Найдем координаты точек E' и A' . Очевидно

$$x_{E'} = a \frac{\sqrt{2}}{2} - l_0 \sin \lambda, \quad y_{E'} = l_0 \cos \lambda,$$

$$x_{A'} = a \frac{\sqrt{2}}{2} + L_0 \sin \lambda, \quad y_{A'} = 2a_0 \cos \lambda - L_0 \cos \lambda,$$

$$L_0 = a - (l_0 + a \operatorname{tg} \beta).$$

Длина нити EA после деформации равна

$$E'A' = \sqrt{(x_{A'} - x_{E'})^2 + (y_{A'} - y_{E'})^2}.$$

Подставляя выражения для координат в предыдущее равенство, после преобразования найдем

$$\begin{aligned}
 E'A' &= a\sqrt{\sin^2 \lambda (1 - \operatorname{tg} \beta)^2 + \cos^2 \lambda (1 + \operatorname{tg} \beta)^2} = \\
 &= a\sqrt{1 + 2 \operatorname{tg} \beta \cos 2\lambda + \operatorname{tg}^2 \beta}.
 \end{aligned}
 \tag{3.52}$$

Очевидно, $E'A' > EA$ и нить удлиняется. Как следует из формулы (3.52), длина полной нити после деформации не зависит от начального положения конца нити (параметр l_0).

Рассмотрим перпендикулярную короткую нить AB с длиной $L_0 / \cos \beta$. После деформации она примет положение $A'B'$. Координаты точек A' и B' в этом случае примут вид

$$\begin{aligned}
 x_{A'} &= \frac{a\sqrt{2}}{2} + L_0 \sin \lambda; & y_{A'} &= 2a \cos \lambda - L_0 \cos \lambda; \\
 x_{B'} &= \frac{a\sqrt{2}}{2} - L_0 \operatorname{tg} \beta \sin \lambda; & y_{B'} &= 2a \cos \lambda - L_0 \operatorname{tg} \beta \cos \lambda.
 \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned}
 A'B' &= \sqrt{(x_{B'} - x_{A'})^2 + (y_{B'} - y_{A'})^2} = \\
 &= L_0 \sqrt{1 - 2 \operatorname{tg} \beta \cos 2\lambda + \operatorname{tg}^2 \beta}.
 \end{aligned}
 \tag{3.53}$$

Из формулы (3.53) следует, что длина деформированной нити $A'B'$ будет короче AB и она будет сжиматься, что может привести к потере устойчивости ткани. При $L_0 = a$ будем иметь формулу для длинных нитей, например, FM . Определим деформации нитей.

Очевидно

$$\varepsilon_1 = \frac{E'A' - EA}{EA} = \cos\beta \sqrt{1 + 2 \operatorname{tg}\beta \cos 2\lambda + \operatorname{tg}^2\beta} - 1.$$

Аналогично для нити AB

$$\varepsilon_1 = \cos\beta \sqrt{1 - 2 \operatorname{tg}\beta \cos 2\lambda + \operatorname{tg}^2\beta} - 1.$$

Полагая отклонение β весьма малым, имеем приближенно

$$\varepsilon_1 \approx \sin\beta \cos 2\lambda, \quad \varepsilon_2 \approx -\sin\beta \cos 2\lambda \quad (3.54)$$

При отклонении в другую сторону ($-\beta$) нетрудно убедиться, что нить EA будет сжиматься, а AB – растягиваться.

На рис. 3.20 построены графики зависимости деформации растяжения нити от угла сдвига $\gamma = 0,5\pi - 2\lambda$ для различных значений отклонения угла β . Для угла ($-\beta$) деформации сжатия в соответствии с (3.54) будут иметь по модулю аналогичные значения.

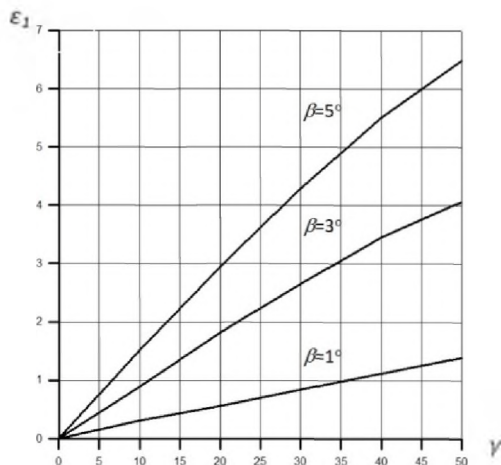


Рис. 3.20. Влияние угла отклонения β на деформации нити при испытании на сдвиг

Рассмотрим влияние эксцентриситета рамки на деформации нитей. Расчетная схема представлена на рис. 3.21.

Зафиксируем положение конца нити на внутренней рамке координатой L , представляющей собой расстояние от центра шарнира до точки закрепления нити. Тогда на основании рис. 3.21 можно определить координаты L точек A' и B' .

$$x_{A'} = \frac{a\sqrt{2}}{2} + L \sin(\lambda - \mu); \quad y_{A'} = L \cos(\lambda - \mu);$$

$$x_{B'} = \frac{a\sqrt{2}}{2} - a \sin \lambda + L \sin(\lambda + \mu); \quad y_{B'} = a \cos \lambda + L \cos(\lambda + \mu).$$

Учитывая соотношение

$$\sin \mu = \frac{\delta}{L},$$

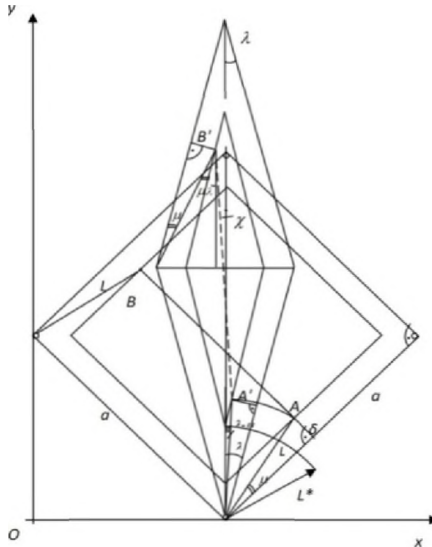


Рис. 3.21. Рабочая схема для определения влияния эксцентриситета рамы на деформации нитей при сдвиге

Найдем

$$\Delta x = x_{B'} - x_{A'} = -a \sin \lambda + 2\delta \cos \lambda;$$

$$\Delta y = y_{B'} - y_{A'} = a \sin \lambda - 2\delta \sin \lambda.$$

Если начальная длина нити AB равна $a - 2\delta$, то после деформации станет равной

$$A'B' = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = a \sqrt{1 - 4 \frac{\delta}{a} \sin 2\lambda + 4 \left(\frac{\delta}{a}\right)^2}.$$

Соответственно, относительная деформация нити имеет вид

$$\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{1 - 4 \frac{\delta}{a} \sin 2\lambda + 4 \left(\frac{\delta}{a}\right)^2}}{1 - 2 \frac{\delta}{a}} - 1.$$

На рис. 3.22 представлены зависимости деформаций нитей для различных относительных значений эксцентриситета при изменении угла сдвига $\gamma = 0,5\pi - 2\lambda$.

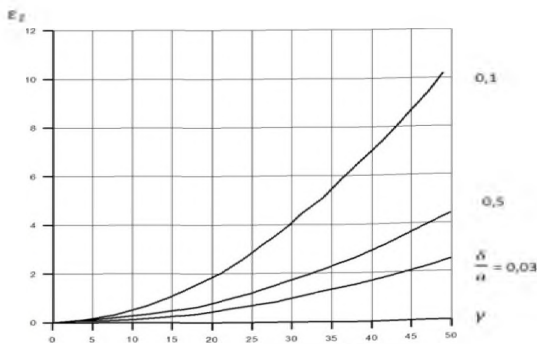


Рис. 3.22. Влияние эксцентриситета $\frac{\delta}{a}$ на деформации нити при испытании на сдвиг

Как видно, деформации нитей являются всегда растягивающими и могут, в принципе, приводить к разрыву нитей при больших величинах угла сдвига, где градиент нарастания натяжения весьма велик.

В процессе деформации рамки с эксцентриситетом нити не будут параллельны сторонам рамки. Определим угол χ между вектором силы P направленным параллельно оси Oy и вектором деформированной нити $\overline{A'B'}$. Тогда [14]

$$\cos \chi = \frac{\Delta y}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} = \frac{\cos \lambda - 2 \frac{\delta}{a} \sin \lambda}{1 - 4 \frac{\delta}{a} \sin 2\lambda + 4 \left(\frac{\delta}{a} \right)^2}.$$

Зависимости угла отклонения от параллельности $\Delta = \lambda - \chi$ от величины угла сдвига γ при различных значениях $\frac{\delta}{a}$ приведены на рис. 3.23.

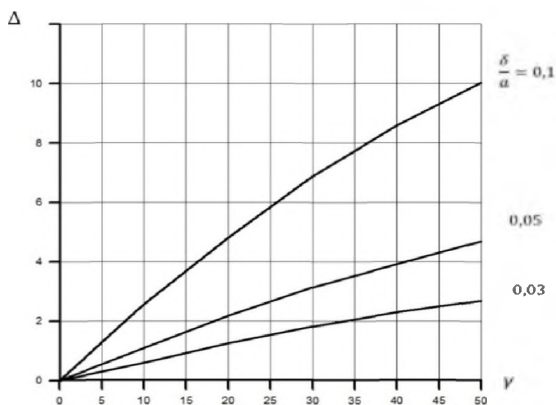


Рис. 3.23. Угловое смещение нити Δ при различных эксцентриситетах и углах сдвига

Экспериментальные исследования по схеме «shearframetest» проводились на ткани полотняного переплетения Т13-А с геомет-

рическими характеристиками, соответствующими ткани Т-13 в таблице 1.1. Оснастка для испытаний представлена на фотографии, рис. 3.15. Сторона рамы между центрами шарниров составила $a = 180$ мм. Эксцентриситет $\delta = 12$ мм; $l_p = 140, 120, 100, 80, 40$ мм. Испытывалось по 5 образцов каждого вида.

На рис. 3.24 представлены результаты испытаний в виде зависимости угла сдвига γ от нагрузки P приложенной к раме для 3-х типов образцов с рабочей частью $L_p = 140$ мм; 80 мм; 40 мм. Размеры рабочей зоны у образца показаны на рис. 3.25.

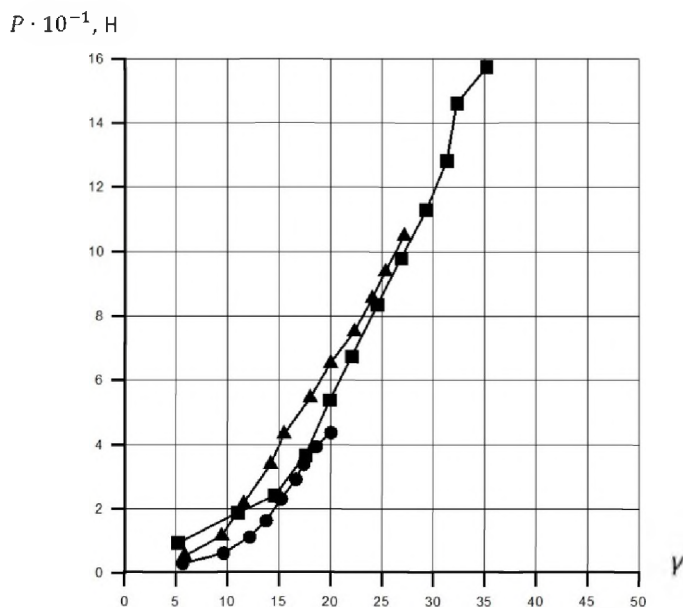


Рис 3.24. Зависимость угла сдвига от нормализованной нагрузки образцов ткани Т-13А при различной l_p : \bullet – $l_p = 140$ мм;
 \blacktriangle – $l_p = 100$ мм; \blacksquare – $l_p = 80$ мм

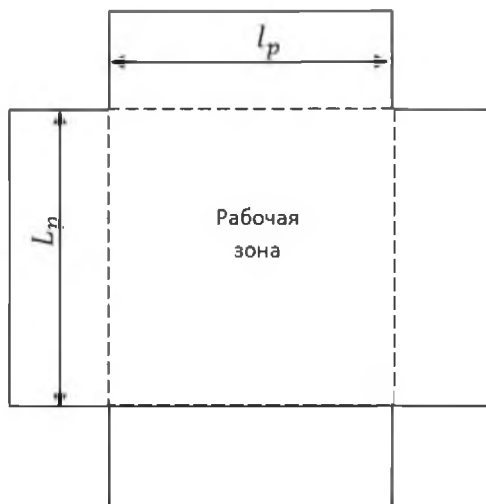


Рис. 3.25. Конфигурация образца. Размеры рабочей зоны

С увеличением длины рабочей части усилие, необходимое для сдвига образца увеличивается. Как видно, результаты испытаний на 3-х типах образцов достаточно компактно накладываются на одну кривую, обобщающую результаты испытаний. Следует отметить, что при малой величине рабочей части $l_p = 40$ мм за счет уменьшения λ и увеличения угла сдвига γ нагрузки в нитях при имеющемся эксцентриситете $\frac{\delta}{a} = 0,067$ достигают значительных величин и при $P \approx 88$ Н имелись случаи разрыва нитей.

На рис. 3.26 приведены результаты испытаний угольной ткани УТ-900 в сравнении с испытаниями стеклоткани Т-13А. Как видно, угольная ткань более податлива на сдвиг.

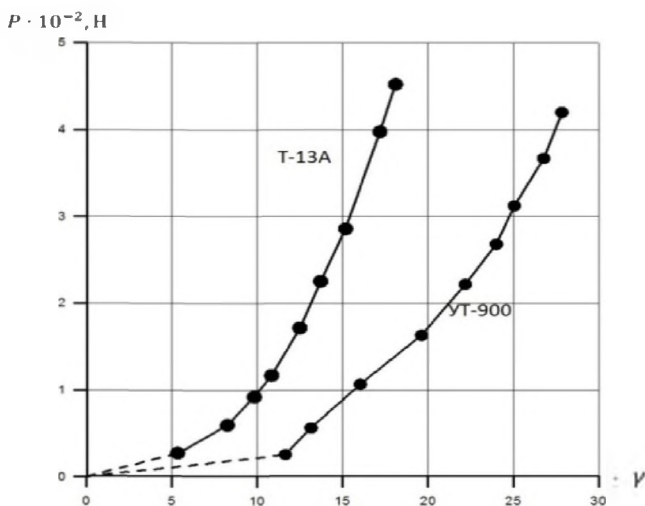


Рис. 3.26. Сравнение результатов испытаний углеткани УТ-900 и стеклоткани Т-13А; $l_p = 140$ мм

Подводя итог решения задачи по изучению деформирования ткани, можно отметить, что проблема требует дальнейшего теоретического исследования. Для практического использования в технологиях трансформации можно рекомендовать экспериментальный метод определения предельных деформаций сдвига в четырехшарнирной раме, предложенный в настоящей работе.

3.10. Оценка податливости препрегов при сжатии

Для моделирования процессов, происходящих при сжатии препрегов, проводились испытания плоских образцов, изготовленных из тканого материала. Если в приспособлении зацементированы нити основы, то при их сжатии исследуемый процесс осуществляется следующим образом. Происходит параллельный сдвиг нитей с уменьшением расстояния между ними. Изменяются геометрические параметры сечения нитей за счет доуплотнения, пока не обеспечивается ее целостность до установления размеров, не зависящих от величины приложенной внешней нагрузки. Эти измене-

ния происходят при небольшой по величине нагрузке. Дальнейшее сжатие характеризуется только упругими деформациями. Такое представление о сжатии имеет важное практическое значение. Дело в том, что если при переработке препрегов достигнуты условия, при которых имеют место упругое сжатие, то это может привести к потере устойчивости армирующего материала. В результате произойдут значительные геометрические изменения, которые могут привести к складкам, заламам и расслоениям в материале готового изделия, что недопустимо. На этом основании переработка препрегов должна осуществляться в пределах неупругих деформаций. Отсюда вытекает необходимость знания максимального значения неупругих деформаций для каждого семейства нитей.

Если у второго семейства концы нитей не закреплены, то при деформации они могут свободно перемещаться. При сжатии такое свободное перемещение позволяет увеличить долю неупругого сжатия, так как в этом случае появляется возможность неупруго изменить сечение нити, уменьшая ширину сечения за счет увеличения ее толщины.

Проведенные исследования позволяют сделать следующий вывод. При испытаниях образцов ткани с использованием приспособления в виде четырехзвенника упругая стадия сжатия первоначально наступает у семейства нитей, концы которых защемлены. Второе семейство нитей в это время испытывает только неупругие деформации сжатия и поэтому практически деформационное поведение образца ткани может быть описано деформациями сжатия первого семейства. При этом первое семейство берет на себя значительную часть внешней нагрузки, расходуя ее на упругое сжатие.

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

Представление сжатия тканых материалов, состоящего из двух фаз неупругой и упругой, позволяет предположить линейную зависимость перемещения ΔW от нагрузки P (3.43).

Результаты испытаний для ткани Т-13 представлены в таблице 3.15. Здесь в таблице первая строка данных относится к случаю, ко-

гда в приспособлении защемлены нити основы, вторая строка данных – защемлены нити утка, третья строка – все концы нитей защемлены.

Таблица 3.15

Результаты испытаний образцов ткани Т-13 на сжатие

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

Используя данные таблицы 3.15 из системы (3.50) найдены величины γ и γ_1 .

В случае заземления нитей основы

$$\gamma = 63,8 \text{ мм}; \quad \gamma_1 = 1,39 \text{ мм/Н.}$$

В случае заземления нитей утка

$$\gamma = 71,6 \text{ мм}; \quad \gamma_1 = 1,4 \text{ мм/Н.}$$

В случае заземления нитей основы и утка

$$\gamma = 62,4 \text{ мм}; \quad \gamma_1 = 1,55 \text{ мм/Н.}$$

Отмечено, что в процессе проведения испытаний наблюдалось увеличение натяжения нитей, у которых концы заземлены. Отсюда следовал выбор интервала изменения нагрузки P от 0 до 250 Н, так при $P > 250$ Н имелись случаи разрыва нитей. По результатам испытаний следует вывод о том, что если концы нитей заземлены, то в результате поворота одного семейства нитей относительно второго у первого семейства возникают напряжения растяжения, как противодействие сжатию нитей второго семейства.

При деформировании образца ткани, зажатого со всех сторон в приспособлении для испытаний в виде четырехзвенника, изменяется форма образца, оставаясь все время ромбом, у которого сторона не меняет своих размеров. При этом расстояние между точками заземления у каждой нити не изменяется. Элементарная ячейка ткани деформируется так же, как и образец ткани. Стороны ячейки ткани (расстояния между соседними угловыми точками ячейки) также не меняют своих размеров. Ячейка состоит из двух нитей основы и двух нитей утка. При деформации угол в вершине ячейки становится равным $\gamma < 0,5\pi$. В результате ширина нитей изменяется. Если отсутствуют зазоры между нитями, то ширина нитей становится равной

$$b'_i = b \sin \gamma.$$

Рассмотрим, может ли изменяться ширина нитей только в результате упругих деформаций? По результатам испытаний установлено, что уменьшение ширины нити b_i' по сравнению с исходным размером составляет больше 10%. Предполагая причиной этому уменьшению присутствие упругих деформаций, оценим изменение толщины нитей. При упругих деформациях площадь сечения нитей практически не изменяется. Таким образом, уменьшение ширины нитей влечет за собой увеличение их толщины. Примем геометрическую модель ткани, представленную зависимостями (2.23). Тогда имеем

$$b_i = 2R_i\alpha_i, \quad h_i = R_i\alpha_i^2, \quad S_i = \frac{4}{3}R_i^2\alpha_i^3,$$

$$b_i' = 2R_i'\alpha_i', \quad h_i' = R_i'\alpha_i'^2, \quad S_i' = \frac{4}{3}R_i'^2\alpha_i'^3,$$

где b_i , R_i , α_i и S_i – ширина, радиус, угол в вершине и площадь сечения нити в виде луночки (см. рис. 2.15); знак « ' » означает значение тех же размеров после деформации.

Из предыдущих соотношений с учетом того, что $S_i = S_i'$, найдем

$$\frac{b_i}{b_i'} = \frac{h_i'}{h_i}.$$

Этот означает, что если в результате деформации ширина нити уменьшилась на 10%, то ее высота сечения должна увеличиться на 10%. Увеличение толщины нитей приводит к увеличению амплитуды изогнутости нитей на 10%, что должно компенсироваться увеличением их длины. Так как концы нитей защемлены, то такое может произойти только путем растяжения нитей. Однако стеклянные нити могут растягиваться, но не более чем на 2 %. Таким образом, упругое увеличение толщины нитей более чем на 10 % невозможно, так как при испытаниях они разрушились бы. Следовательно, деформация сдвига у тканей происходит в результате

неупругих деформаций за счет уменьшения зазоров между нитями и за счет более компактного расположения в сечении нитей элементарных нитей.

Анализ данных таблицы показывает, что результаты испытаний в первом и третьем случаях практически одинаковы в диапазоне нагружения, обеспечивающего неупругое сжатие. Это означает, что в третьем случае при испытаниях, когда нити основы достигли фазы упругого сжатия, то нити утка еще нет. Такое положение доказывает правильность сделанных выше выводов о сжатии. Это позволяет разработать методику для нахождения характеристик сжатия каждого семейства нитей у ткани.

Определим вначале относительное сжатие соответствующего семейства нитей. Для этого воспользуемся схемой деформирования рамы, изображенной на рис. 3.14. Искомое относительное сжатие ε равно

$$\varepsilon = \frac{AD - ED'}{AD}.$$

Запишем теорему косинусов для треугольника $AD'B'$. Если обозначим $\angle C'AD'$ через β , то получим

$$(AB')^2 = (B'D')^2 + (AD')^2 - 2B'D'AD' \cos \angle AD'B'.$$

После подстановки в это равенство соответствующих величин получим

$$(\sqrt{2}a + \Delta W)^2 = a^2 + a^2 + 2a^2 \cos \beta.$$

С учетом того, что $EA = a \cos \beta$, найдем

$$EA = \frac{(\sqrt{2}a + \Delta W)^2 - 2a^2}{2a} = \sqrt{2} \Delta W + \frac{\Delta W}{2a}. \quad (3.55)$$

Вторым слагаемым в полученном равенстве можно пренебречь, так как ΔW малая величина по сравнению с a . Таким образом

$$EA = \sqrt{2} \Delta W,$$

$$ED' = \sqrt{(AD')^2 - (EA)^2} = \sqrt{a^2 - 2(\Delta W)^2} \approx a \left[1 - \left(\frac{\Delta W}{a} \right)^2 \right], \quad (3.56)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta W}{a} \right)^2 = \left(\frac{\gamma + \gamma_1 P}{a} \right)^2 \approx \frac{\gamma^2}{a^2} + \frac{2\gamma\gamma_1}{a^2} P.$$

Пусть нагрузка P по величине такая, что первое семейство нитей испытывает упругое сжатие. Тогда между нагрузкой P и давлением сжатия семейства нитей P_1 существует приближенная зависимость (относительно небольшая часть нагрузки P передается на неупругое сжатие второго семейства нитей)

$$P = P_1 \cos \frac{\beta}{2}.$$

Выражение для $\cos \frac{\beta}{2}$ найдем из зависимости (3.55).

$$\begin{aligned} P &= P_1 \sqrt{\frac{1 + \cos \beta}{2}} = P_1 \sqrt{\frac{1 + \sqrt{2} \frac{\Delta W}{a} + \frac{(\Delta W)^2}{2a^2}}{2}} \approx \\ &\approx \frac{P_1}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{\sqrt{2} \Delta W}{2a} \right) = \frac{P_1}{\sqrt{2}} \left[1 + \frac{\sqrt{2} (\gamma + \gamma_1 P)}{2a} \right] \approx \frac{P_1}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{\sqrt{2} \gamma}{2a} \right). \end{aligned}$$

Подставляя это значение в (3.56), получим

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \frac{\gamma \gamma_1}{a^2} \left(\sqrt{2} + \frac{\gamma}{a} \right) P_1, \quad (3.57)$$

где

$$\varepsilon_1 = \frac{\gamma^2}{a^2}.$$

Первое слагаемое в равенстве для ε отвечает за неупругую от- носительную часть сжатия семейства нитей, а второе – за упругую.

С учетом того, что

$$\frac{\sigma_{сжс}}{E_{сжс}} = \frac{\gamma \gamma_1 h}{a} \left(\sqrt{2} + \frac{\gamma}{a} \right) \frac{P_1}{ah},$$

найдем модуль упругости при сжатии семейства нитей

$$E_{сжс} = \frac{a}{\gamma \gamma_1 h \left(\sqrt{2} + \frac{\gamma}{a} \right)}. \quad (3.58)$$

Здесь $\sigma_{сжс} = \frac{P_1}{ah}$ – напряжение упругого сжатия семейства нитей;

$E_{сжс}$ – модуль упругости при сжатии этого семейства нитей.

Необходимо отметить, что понятие упругого сжатия для препрегов несколько отличается от понятия упругого сжатия твердого тела. Как в первом, так и во втором случаях, деформации тел являются достаточно малыми, а феноменологические соотношения, связывающие деформированное и напряженное состояния, линейны. Однако, если во втором случае тело полностью восстанавливает свою первоначальную форму после снятия нагрузки, то, как показали экспериментальные исследования, в первом случае первоначальная форма не восстанавливается полностью. Такова особенность деформирования препрегов.

3.11. Модель деформирования косоугольных тканей из растяжимых нитей

Современные конструкционные ткани, выпускаемые промышленностью, представляют собой ортогонально армированные структуры по основе и утку из стеклянных, угольных и органических волокон. Общее свойство таких тканей заключается в том, что предельные деформации волокон в направлении армирования не превышают 2 %. В то же время деформируемость тканей в направлениях, отличных от направлений армирования, может быть существенно больше. На этом свойстве основаны технологические процессы намотки и выкладки с использованием косоугольно армированных тканей, полученных раскроем из ортогональных тканей под углом φ (рис. 3.27) [18].

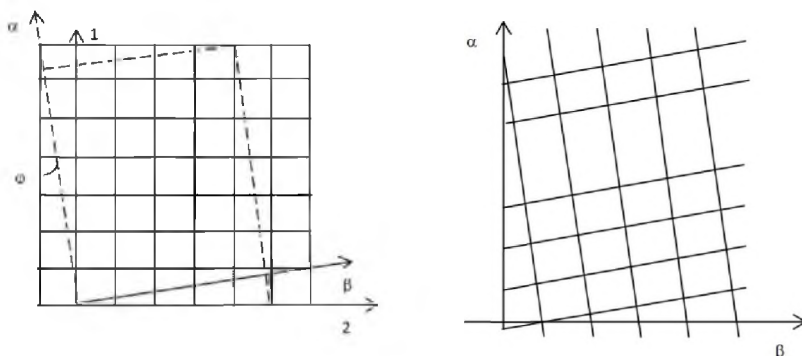


Рис. 3.27. Раскрой ортогональной ткани

Простейшим примером использования косоугольно армированных тканей является тканная кольцевая намотка конической оболочки (рис. 3.28). Длина левой кромки ткани за один оборот оправки составляет $2\pi r_1$, соответственно правой – $2\pi r_2$. Таким образом, ткань должна обеспечить максимальную деформацию растяжения для осуществления намотки конуса не менее

$$\varepsilon = \frac{2\pi r_2 - 2\pi r_1}{2\pi r_1} = \frac{r_2}{r_1} - 1 = \frac{H \operatorname{tg}\beta}{r_1} \quad (3.59)$$

Элементарный анализ формулы (3.59) показывает, что с увеличением угла конусности β и отношения $\frac{H}{r_1}$ требования к деформативности ткани увеличиваются. Деформация ткани в процессе намотки будет также сопровождаться деформацией в осевом направлении и сдвигом.

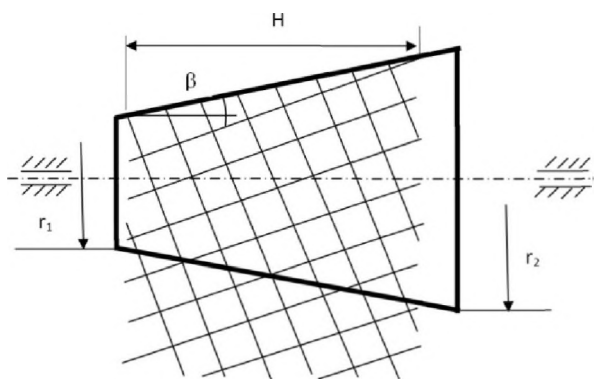


Рис. 3.28. Намотка тканью конической оболочки

Тканая кольцевая намотка конической оболочки предполагает свободное опирание концов нитей на оправку. В этом случае неупругий поворот нитей происходит при отсутствии в них растягивающих напряжений. Аналогично, трансформация ткани при намотке шпангоутов сложного сечения осуществляется при отсутствии в нитях растягивающих усилий, если концы нитей не закреплены. Таким образом, для рассмотренных примеров предельные деформационные характеристики ткани при ее трансформации должны быть больше по сравнению с теми же характеристиками, найденными в главе 2. Дело в том, что если концы нитей не закреплены, то при деформации они могут свободно перемещаться. При

сжатия такое свободное перемещение позволяет увеличить долю неупругого сжатия, так как в этом случае появляется возможность для нитей неупруго изменять свои сечения, уменьшая ширину сечения за счет увеличения его толщины. Такая трансформация имеет свои пределы. Нахождению предельных значений деформации сечения нитей посвящены исследования, проведенные в настоящей главе. Экспериментальная оценка нахождения неупругих деформаций сжатия за счет увеличения толщин нитей не представляется возможной. Однако такая оценка может быть осуществлена с применением теоретических исследований.

Построим модель деформирования данного типа тканей, для чего выделим элементарную ячейку ткани до и после деформации (рис. 3.29). Для исключения перемещений ячейки, как жесткого целого, точку «О» считаем закрепленной.

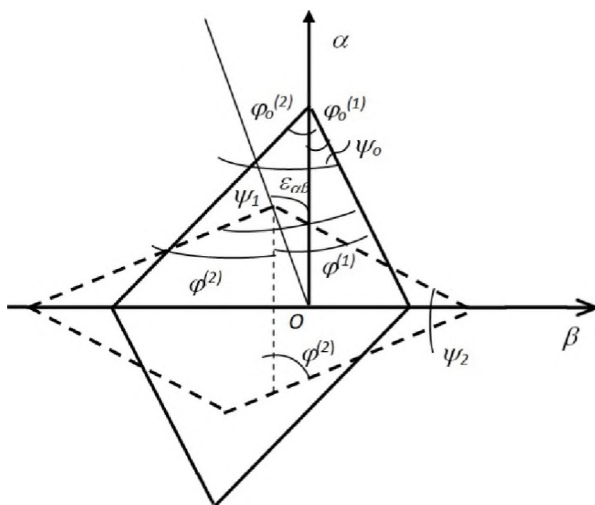


Рис. 3.29. Элементарная ячейка ткани до (-) и после (---) деформации

В общем случае будем полагать, что ткань растяжима по направлениям, совпадающим с направлениями армирования нитей. Так как деформации в направлениях, не совпадающих с направлениями армирования, может достигать значительных величин, то расчетная

модель должна учитывать большие деформации, т.е. быть нелинейной. Такие модели в литературе известны [18–20]. Наиболее полной можно считать модель, представленную в работе [19], которая получена из рассмотрения плоской задачи теории упругости.

В настоящей работе соотношения между деформациями получены из чисто геометрического подхода, что существенно упростило вывод основных соотношений по сравнению с работой [19] и придало им необходимую наглядность. Расчетная схема, соответствующая характеру деформирования элементарной ячейки ткани, для первого семейства нитей с углом армирования $\varphi_0^{(1)}$ представлена на рис. 3.30.

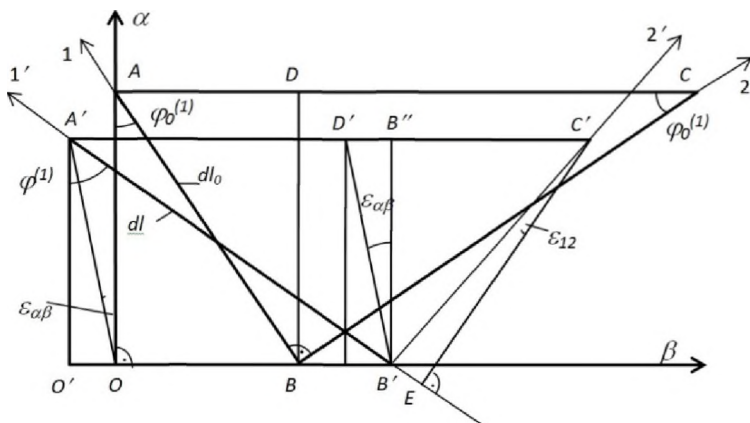


Рис. 3.30. Расчетная схема для установления соотношений между деформациями в ткани

Введем ряд обозначений применительно к рис. 3.30. $AB = dl_0$ – длина элемента нити с начальным углом армирования $\varphi_0^{(1)}$; $A'B' = dl$ – длина элемента нити после деформации; $\varphi^{(1)}$ – угол армирования после деформации; $\varepsilon_{\alpha\beta}$ – деформация сдвига в осях α , β (изменение прямого угла AOB после деформации);

$\varepsilon_{\alpha\beta} = \angle A'OB - \angle AOB$; ε_{12} – деформация сдвига в осях 1, 2 (изменение прямого угла ABC после деформации); $\varepsilon_{12} = \angle A'B'C' - \angle ABC$.

Определим деформации линейных элементов:

– деформация нитей

$$\varepsilon_1^{(1)} = \frac{dl}{dl_0} - 1;$$

– деформации координатных линий α , β

$$\varepsilon_\alpha = \frac{OA'}{OA} - 1; \quad \varepsilon_\beta = \frac{OB'}{OB} - 1;$$

– деформация в направлении перпендикулярном нитям

$$\varepsilon_2^{(1)} = \frac{B'C'}{BC} - 1; \quad \varepsilon_{21}^{(1)} = \frac{EC'}{BC} - 1.$$

Здесь поперечная деформация $\varepsilon_{21}^{(1)}$ соответствует направлению, перпендикулярному деформированному положению нити. Деформация $\varepsilon_2^{(1)}$ представляет деформацию первого семейства нитей в перпендикулярном направлении к ним.

Установим соотношения между введенными деформациями.

Из $\triangle OAB$ найдем, что

$$OA = dl_0 \cos \varphi_0^{(1)}.$$

Тогда на основании предыдущего равенства получим

$$OA' = OA(1 + \varepsilon_\alpha) = dl_0 (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)}.$$

Из $\Delta O'A'O$ следует

$$O'A' = OA' \cos \varepsilon_{\alpha\beta} = dl_0 (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)} \cos \varepsilon_{\alpha\beta} .$$

В результате из $\Delta O'A'B'$ найдем

$$\cos \varphi^{(1)} = \frac{O'A'}{dl} = \frac{(1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)} \cos \varepsilon_{\alpha\beta}}{1 + \varepsilon_1^{(1)}} , \quad (3.60)$$

$$\sin \varphi^{(1)} = \frac{O'B'}{dl} ,$$

где $O'B' = O'O + OB'$.

Из $\Delta O'A'O$ найдем, что

$$O'O = OA' \sin \varepsilon_{\alpha\beta} = dl_0 (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta} .$$

Из ΔOAB определим

$$OB = dl_0 \sin \varphi_0^{(1)} .$$

Тогда

$$OB' = OB(1 + \varepsilon_\beta) = dl_0 (1 + \varepsilon_\beta) \sin \varphi_0^{(1)} .$$

Окончательно имеем

$$\sin \varphi^{(1)} = \frac{(1 + \varepsilon_\beta) \sin \varphi_0^{(1)} + (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta}}{1 + \varepsilon_1^{(1)}} . \quad (3.61)$$

Возведем в квадрат каждое из выражений (3.60) и (3.61) и сложим. Получим

$$\begin{aligned} \left(1 + \varepsilon_1^{(1)}\right)^2 &= (1 + \varepsilon_\alpha)^2 \cos^2 \varphi_0^{(1)} + (1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta) \sin 2\varphi_0^{(1)} \times \\ &\times \sin \varepsilon_{\alpha\beta} + (1 + \varepsilon_\beta)^2 \sin^2 \varphi_0^{(1)}. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Рассмотрим $\triangle ABC$. Очевидно

$$BC = dl_0 \operatorname{ctg} \varphi_0^{(1)}.$$

Тогда найдем

$$B'C' = dl_0 \left(1 + \varepsilon_2^{(1)}\right) \operatorname{ctg} \varphi_0^{(1)}.$$

Для прямоугольного $\triangle B'B''C'$ справедливо соотношение

$$(B'C')^2 = (B'B'')^2 + (B''C')^2, \quad (3.63)$$

где

$$B'B'' = O'A' = dl_0 (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)} \cos \varepsilon_{\alpha\beta}.$$

Рассмотрим треугольники DBC и $D'B'C'$. Точка O зафиксирована. Поэтому при деформации она остается на месте. Это было использовано при предыдущих исследованиях. Величины dl и dl_0 выбраны достаточно малыми, и поэтому можно считать, что относительные деформации осей OB и AC одинаковы. В таком случае должны выполняться соотношения

$$\frac{OB'}{OB} = \frac{D'C'}{DC} = 1 + \varepsilon_\beta.$$

В свою очередь

$$DC = AC - OB = \frac{dl_0}{\sin \varphi_0^{(1)}} - dl_0 \sin \varphi_0^{(1)} = dl_0 \frac{\cos^2 \varphi_0^{(1)}}{\sin \varphi_0^{(1)}}.$$

Тогда

$$D'C' = dl_0 (1 + \varepsilon_\beta) \frac{\cos^2 \varphi_0^{(1)}}{\sin \varphi_0^{(1)}}.$$

Из $\Delta D'B'C'$ можно записать

$$B''C' = D'C' - D'B'',$$

где $D'B'' = O'O = dl_0 (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta}$.

Тогда

$$B''C' = dl_0 \left[\frac{(1 + \varepsilon_\beta) \cos^2 \varphi_0^{(1)}}{\sin \varphi_0^{(1)}} - (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta} \right].$$

Подставляя найденные выражения в формулу (3.63) после преобразований получим

$$\begin{aligned} \left(1 + \varepsilon_2^{(1)}\right)^2 &= (1 + \varepsilon_\alpha)^2 \sin^2 \varphi_0^{(1)} - (1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta) \times \\ &\times \sin 2\varphi_0^{(1)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta} + (1 + \varepsilon_\beta)^2 \cos^2 \varphi_0^{(1)}. \end{aligned} \quad (3.64)$$

Выведем формулу для деформации $\varepsilon_{21}^{(1)}$. По определению

$$1 + \varepsilon_{21}^{(1)} = \frac{EC'}{BC},$$

откуда

$$BC = \frac{EC'}{1 + \varepsilon_{21}^{(1)}}.$$

С другой стороны

$$BC = \frac{B'C'}{1 + \varepsilon_2^{(1)}}.$$

Тогда

$$1 + \varepsilon_{21}^{(1)} = \left(1 + \varepsilon_2^{(1)}\right) \frac{EC'}{B'C'}.$$

Из прямоугольного $\Delta B'EC'$ имеем

$$\frac{EC'}{B'C'} = \cos \varepsilon_{12}^{(1)}.$$

Тогда

$$1 + \varepsilon_{21}^{(1)} = \left(1 + \varepsilon_2^{(1)}\right) \cos \varepsilon_{12}^{(1)}. \quad (3.65)$$

Чтобы получить выражение для деформации $\varepsilon_{12}^{(1)}$, рассмотрим $\Delta A'B'C'$. По определению

$$\varepsilon_{12}^{(1)} = \angle A'B'C' - \pi / 2.$$

Тогда

$$\cos \angle A'B'C' = \cos \left(\varepsilon_{12}^{(1)} + \pi / 2 \right) = -\sin \varepsilon_{12}^{(1)}.$$

По теореме косинусов

$$\cos \angle A'B'C' = -\sin \varepsilon_{12}^{(1)} = \frac{dl^2 + (B'C')^2 - (A'C')^2}{2dl(B'C')},$$

где $A'C' = A'D' + D'C'$. С учетом ранее выведенных зависимостей

$$B'C' = (1 + \varepsilon_2^{(1)})BC, \quad BC = dl_0 \operatorname{ctg} \varphi_0^{(1)},$$

$$D'C' = dl_0 (1 + \varepsilon_\beta) \frac{\cos^2 \varphi_0^{(1)}}{\sin \varphi_0^{(1)}}, \quad A'D' = OB',$$

$$OB' = (1 + \varepsilon_\beta)OB, \quad OB = dl_0 \sin \varphi_0^{(1)},$$

получим

$$-\sin \varepsilon_{12}^{(1)} = \frac{(1 + \varepsilon_1^{(1)})^2 - (1 + \varepsilon_2^{(1)})^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi_0^{(1)} - \left[(1 + \varepsilon_\beta) \sin \varphi_0^{(1)} + (1 + \varepsilon_\beta) \frac{\cos^2 \varphi_0^{(1)}}{\sin \varphi_0^{(1)}} \right]^2}{2(1 + \varepsilon_1^{(1)})(1 + \varepsilon_2^{(1)}) \operatorname{ctg} \varphi_0^{(1)}}$$

После преобразований найдем

$$\sin \varepsilon_{12}^{(1)} = \frac{\left[(1 + \varepsilon_\beta)^2 - (1 + \varepsilon_\alpha)^2 \right] \cos \varphi_0^{(1)} \sin \varphi_0^{(1)} + (1 + \varepsilon_\beta)(1 + \varepsilon_\alpha) \sin \varepsilon_{\alpha\beta} \cos 2\varphi_0^{(1)}}{(1 + \varepsilon_1^{(1)})(1 + \varepsilon_2^{(1)})} \quad (3.66)$$

Выражения (3.60) – (3.62), (3.34) – (3.60) полностью соответствуют полученным соотношениям в работе [19].

Расчетные формулы для второго семейства нитей можно получить из найденных соотношений заменой $\varepsilon_1^{(1)}$, $\varepsilon_2^{(1)}$, $\varepsilon_{12}^{(1)}$, $\varepsilon_{21}^{(1)}$, $\varphi_0^{(1)}$, $\varphi^{(1)}$ на $\varepsilon_1^{(2)}$, $\varepsilon_2^{(2)}$, $\varepsilon_{12}^{(2)}$, $\varepsilon_{21}^{(2)}$, $(-\varphi_0^{(2)})$, $(-\varphi^{(2)})$, соответственно, сохраняя обозначения для деформаций ε_α , ε_β , $\varepsilon_{\alpha\beta}$ (из условия совместности). Тогда получим

$$\cos \varphi^{(2)} = \frac{(1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(2)} \cos \varepsilon_{\alpha\beta}}{1 + \varepsilon_1^{(2)}}. \quad (3.67)$$

$$\sin \varphi^{(2)} = \frac{(1 + \varepsilon_\beta) \sin \varphi_0^{(2)} - (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(2)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta}}{1 + \varepsilon_1^{(2)}}. \quad (3.68)$$

$$\begin{aligned} (1 + \varepsilon_1^{(2)})^2 &= (1 + \varepsilon_\alpha)^2 \cos^2 \varphi_0^{(2)} - (1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta) \times \\ &\times \sin 2\varphi_0^{(2)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta} + (1 + \varepsilon_\beta)^2 \sin^2 \varphi_0^{(2)}; \end{aligned} \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} (1 + \varepsilon_2^{(2)})^2 &= (1 + \varepsilon_\alpha)^2 \sin^2 \varphi_0^{(2)} + (1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta) \times \\ &\times \sin 2\varphi_0^{(2)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta} + (1 + \varepsilon_\beta)^2 \cos^2 \varphi_0^{(2)} \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} \sin \varepsilon_{12}^{(2)} &= \left\{ \left[(1 + \varepsilon_\alpha)^2 - (1 + \varepsilon_\beta)^2 \right] \sin \varphi_0^{(2)} \cos \varphi_0^{(2)} + \right. \\ &+ (1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta) \sin \varepsilon_{\alpha\beta} \cos 2\varphi_0^{(2)} \left. \right\} \left[(1 + \varepsilon_1^{(2)})(1 + \varepsilon_2^{(2)}) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$(1 + \varepsilon_{21}^{(2)}) = (1 + \varepsilon_2^{(2)}) \cos \varepsilon_{12}^{(2)}.$$

Десять независимых уравнений (3.61), (3.62), (3.64) – (3.66), (3.68) – (3.72) связывают 13 параметров: $\varphi^{(1)}$, $\varphi^{(2)}$, $\varepsilon_1^{(1)}$, $\varepsilon_1^{(2)}$, ε_α , ε_β , $\varepsilon_{\alpha\beta}$, $\varepsilon_2^{(1)}$, $\varepsilon_2^{(2)}$, $\varepsilon_{12}^{(1)}$, $\varepsilon_{12}^{(2)}$, $\varepsilon_{21}^{(1)}$, $\varepsilon_{21}^{(2)}$. В таком случае три параметра должны быть либо заданы, либо получены из дополнительных условий.

3.12. Моделирование деформаций из нерастяжимых нитей

Так как деформации вдоль направлений армирования весьма малы (менее 2 %), то логично принять гипотезу о нерастяжимости нитей.

Получим систему разрешающих уравнений с учетом гипотезы о нерастяжимости нитей. Вычтем из уравнения (3.62) уравнение (3.69), полагая в них $\varepsilon_1^{(1)} = \varepsilon_1^{(2)} = 0$. Тогда после преобразований получим

$$\sin \varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{(1 + \varepsilon_\alpha)^2 - (1 + \varepsilon_\beta)^2}{2(1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta)} \operatorname{tg} \left(\varphi_0^{(1)} - \varphi_0^{(2)} \right). \quad (3.73)$$

Подставляя полученный результат в любое из уравнений (3.62), (3.69) найдем

$$\left[(1 + \varepsilon_\alpha)^2 - 1 \right] \cos \varphi_0^{(1)} \cos \varphi_0^{(2)} + \left[(1 + \varepsilon_\beta)^2 - 1 \right] \sin \varphi_0^{(1)} \sin \varphi_0^{(2)} = 0. \quad (3.74)$$

Рассмотрим вариант ортогональной ткани, для которой $\varphi_0^{(1)} + \varphi_0^{(2)} = \pi / 2$. Тогда из (3.73) и (3.74) найдем

$$\sin \varepsilon_{\alpha\beta} = \operatorname{ctg} 2\varphi_0^{(1)} \frac{(1 + \varepsilon_\beta)^2 - (1 + \varepsilon_\alpha)^2}{2(1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta)}, \quad (3.75)$$

$$(1 + \varepsilon_\alpha)^2 + (1 + \varepsilon_\beta)^2 = 2. \quad (3.76)$$

Уравнение (3.76) в осях α и β представляет собой уравнение окружности с центром, координаты которого $(-1, -1)$, и радиусом $\sqrt{2}$.

В случае если исходная ткань неортогональная, то уравнение (3.74) представляет собой уравнение эллипса с центром с координатами $(-1, -1)$

$$\frac{(1 + \varepsilon_\alpha)^2}{a^2} + \frac{(1 + \varepsilon_\beta)^2}{b^2} = 1, \quad (3.77)$$

где

$$a^2 = 1 + \operatorname{tg} \varphi_0^{(1)} \operatorname{tg} \varphi_0^{(2)}; \quad b^2 = 1 + \operatorname{ctg} \varphi_0^{(1)} \operatorname{ctg} \varphi_0^{(2)}.$$

Такие ткани относятся к классу биаксиальных.

Рассмотрим вариант биаксиальной симметричной ткани с углами армирования $\pm \varphi_0$. Тогда $\varphi_0^{(1)} = \varphi_0^{(2)} = \varphi_0$ и на основании соотношения (3.73) получим, что $\varepsilon_{\alpha\beta} = 0$. Данный результат является следствием симметрии ткани. Соответственно

$$a = \frac{1}{\cos \varphi_0}; \quad b = \frac{1}{\sin \varphi_0}. \quad (3.78)$$

Рассмотрим уравнения (3.64) и (3.70) для поперечных деформаций ткани ε_2 .

В случае ортогонального расположения нитей, полагая $\varphi_0^{(2)} = \pi/2 - \varphi_0^{(1)}$ и складывая почленно уравнения, получим следующий инвариант, не зависящий от угла армирования

$$\left(1 + \varepsilon_2^{(1)}\right)^2 + \left(1 + \varepsilon_2^{(2)}\right)^2 = (1 + \varepsilon_\alpha)^2 + (1 + \varepsilon_\beta)^2.$$

Это соотношение с учетом уравнения (3.76) удовлетворяется в случае, если

$$\varepsilon_2^{(1)} = \varepsilon_2^{(2)} = 0. \quad (3.79)$$

Полученный результат вполне объясним физически, и является следствием ортогонального армирования и гипотезы о нерастяжимости.

Для биаксиальных симметричных тканей

$$\varepsilon_2^{(1)} = \varepsilon_2^{(2)} = \varepsilon_2.$$

Так как $\sin \varepsilon_{\alpha\beta} = 0$, то из любого из уравнений (3.64), (3.70) получим

$$(1 + \varepsilon_2)^2 = (1 + \varepsilon_\alpha)^2 \sin^2 \varphi_0 + (1 + \varepsilon_\beta)^2 \cos^2 \varphi_0. \quad (3.80)$$

В отличие от ортогонального армирования в биаксиальных тканях деформации ε_2 не равны нулю.

Для определения ε_{12} рассмотрим уравнения (3.66) и (3.71). Для нерастяжимых нитей ортогонального армирования примем в этих уравнениях

$$\varepsilon_1^{(1)} = \varepsilon_1^{(2)} = \varepsilon_2^{(1)} = \varepsilon_2^{(2)} = 0.$$

Складывая почленно полученные соотношения, получим

$$\sin \varepsilon_{12}^{(1)} + \sin \varepsilon_{12}^{(2)} = 0,$$

или

$$\varepsilon_{12}^{(1)} = -\varepsilon_{12}^{(2)} = \varepsilon_{12}.$$

Таким образом, сдвиговые деформации ε_{12} первого и второго семейства нитей равны по абсолютной величине и противоположны по знаку.

Подставим в уравнение (3.66) и (3.71) выражение для $\sin \varepsilon_{\alpha\beta}$ в форме (3.17). Тогда после преобразований с учетом (3.79) получим

$$\sin \varepsilon_{12}^{(1)} = \frac{(1 + \varepsilon_{\beta})^2 - (1 + \varepsilon_{\alpha})^2}{2 \sin 2\varphi_0^{(1)}} = -\sin \varepsilon_{12}^{(2)}. \quad (3.81)$$

Рассмотрим уравнения (3.65) и (3.72). С учетом (3.21) найдем

$$\varepsilon_{21}^{(1)} = \varepsilon_{21}^{(2)} = \cos \varepsilon_{12} - 1, \quad (3.82)$$

где ε_{12} определяется из формулы (3.23).

Из (3.82) следует, что для тканей, выполненных из нерастяжимых нитей ортогонального армирования, поперечные деформации являются сжимающими.

Рассмотрим вариант биаксиальных симметричных тканей. На основании (3.66) при $\varepsilon_{\alpha\beta} = 0$ получим

$$\sin \varepsilon_{12} = \frac{(1 + \varepsilon_{\beta})^2 - (1 + \varepsilon_{\alpha})^2}{(1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)} \sin \varphi_0 \cos \varphi_0, \quad (3.83)$$

где $(1 + \varepsilon_2)$ определяется из выражения (3.80); $\varepsilon_1 = 0$, если ткань выполнена из нерастяжимых нитей.

Формулы (3.80), (3.83) справедливы также для растяжимых нитей. Для определения ε_{21} можно воспользоваться соотношением (3.65), полагая в нем $\varepsilon_{21}^{(1)} = \varepsilon_{21}$, $\varepsilon_2^{(1)} = \varepsilon_2$, $\varepsilon_{12}^{(1)} = \varepsilon_{12}$,

$$1 + \varepsilon_{21} = (1 + \varepsilon_2) \cos \varepsilon_{12}. \quad (3.84)$$

Для биаксиальных симметричных тканей из нерастяжимых нитей условие (3.74) имеет вид

$$1 = (1 + \varepsilon_{\alpha})^2 \cos^2 \varphi_0 + (1 + \varepsilon_{\beta})^2 \sin^2 \varphi_0. \quad (3.85)$$

Тогда для нерастяжимых нитей с учетом (3.80), (3.83), (3.84) получим следующие варианты формул

$$\begin{aligned} \sin \varepsilon_{12} &= \frac{(1 + \varepsilon_{\beta})^2 - 1}{\left[1 - (1 + \varepsilon_{\beta})^2 (1 - \operatorname{ctg}^2 \varphi_0)\right]^{1/2}} = \\ &= \frac{1 - (1 + \varepsilon_{\alpha})^2}{\left[1 - (1 + \varepsilon_{\alpha})^2 (1 - \operatorname{tg}^2 \varphi_0)\right]^{1/2}}, \quad (3.86) \\ 1 + \varepsilon_{12} &= (1 + \varepsilon_{\alpha}) (1 + \varepsilon_{\beta}). \end{aligned}$$

Углы армирования тканей в деформированном состоянии определяются по общим формулам (3.60), (3.61), (3.67), (3.68) в зависимости от величин ε_{α} и ε_{β} .

Практический интерес представляет закон изменения углов между армирующими нитями в процессе деформирования. Для ортогонально армированной ткани имеем зависимости (см. рис. 3.29).

$$\psi_1 = \varphi^{(1)} + \varphi^{(2)}.$$

Соответственно

$$\psi_2 = \pi - \left(\varphi^{(1)} + \varphi^{(2)}\right) = \pi - \psi_1.$$

Изменение углов после деформации

$$\gamma_1 = \psi_1 - \pi/2; \quad \gamma_2 = \psi_2 - \pi/2 = -\gamma_1.$$

Получим выражение для $\sin \psi_1$. Очевидно

$$\sin \psi_1 = \sin \left(\varphi^{(1)} + \varphi^{(2)} \right) = \sin \varphi^{(1)} \cos \varphi^{(2)} + \cos \varphi^{(1)} \sin \varphi^{(2)}. \quad (3.87)$$

С учетом равенства $\varphi_0^{(1)} + \varphi_0^{(2)} = \pi / 2$ для ортогональных тканей, выполненных из нерастяжимых нитей, из (3.60), (3.61), (3.67) и (3.68) найдем

$$\cos \varphi^{(1)} = (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)} \cos \varepsilon_{\alpha\beta},$$

$$\sin \varphi^{(1)} = (1 + \varepsilon_\beta) \sin \varphi_0^{(1)} + (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0^{(1)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta},$$

$$\cos \varphi^{(2)} = (1 + \varepsilon_\alpha) \sin \varphi_0^{(1)} \cos \varepsilon_{\alpha\beta},$$

$$\sin \varphi^{(2)} = (1 + \varepsilon_\beta) \cos \varphi_0^{(1)} - (1 + \varepsilon_\alpha) \sin \varphi_0^{(1)} \sin \varepsilon_{\alpha\beta} \varepsilon_{\alpha\beta}.$$

Подставим предыдущие равенства в (3.87). После несложных преобразований для нерастяжимых нитей получим

$$\sin \psi_1 = (1 + \varepsilon_\alpha) (1 + \varepsilon_\beta) \cos \varepsilon_{\alpha\beta}, \quad (3.88)$$

$$\sin \gamma_1 = -\cos \psi_1.$$

Используя формулы (3.75), (3.76), выражения (3.88) можно привести к следующему виду

$$\sin \psi_1 = \left(1 - \frac{\left[1 - (1 + \varepsilon_\alpha)^2 \right]^2}{\sin^2 2\varphi_0^{(1)}} \right)^{1/2} = \left(1 - \frac{\left[(1 + \varepsilon_\beta)^2 - 1 \right]^2}{\sin^2 2\varphi_0^{(1)}} \right)^{1/2} \quad (3.89)$$

$$\sin \gamma_1 = \frac{(1 + \varepsilon_\alpha)^2 - 1}{\sin 2\varphi_0^{(1)}} = \frac{1 - (1 + \varepsilon_\beta)^2}{\sin 2\varphi_0^{(1)}}.$$

Рассмотрим вариант биаксиальных симметричных тканей. Для них, на основании (3.60), (3.61) при $\varepsilon_{\alpha\beta} = \varepsilon_1 = 0$ имеем

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= (1 + \varepsilon_\beta) \sin \varphi_0, \\ \cos \varphi &= (1 + \varepsilon_\alpha) \cos \varphi_0. \end{aligned} \tag{3.90}$$

Соответственно

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 2\varphi, \quad \psi_2 = \pi - 2\varphi; \\ \gamma_1 &= 2(\varphi - \varphi_0); \quad \gamma_2 = -\gamma_1. \end{aligned}$$

Тогда с учетом (3.90) получим

$$\begin{aligned} \sin \psi_1 &= (1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta) \sin 2\varphi_0, \\ \sin \gamma_1 &= \sin 2\varphi_0 (\varepsilon_\beta - \varepsilon_\alpha) (1 + \varepsilon_\alpha \cos^2 \varphi_0 + \varepsilon_\beta \sin^2 \varphi_0). \end{aligned} \tag{3.91}$$

3.13. Анализ предельно допустимых диапазонов возможных деформаций ортогонально армированных тканей

Разработанная модель деформирования построена для всего спектра изменения деформаций ε_α и ε_β . Однако существует ряд ограничений, которые определяют предельно допустимый диапазон возможных деформаций ткани. Проведем анализ этих ограничений. Рассмотрим ортогонально армированные ткани. На основании формул (3.75, 3.76) имеем

$$\sin^2 \varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{\operatorname{ctg}^2 2\varphi_0^{(1)} \left[(1 + \varepsilon_\beta)^2 - 1 \right]^2}{(1 + \varepsilon_\beta)^2 \left[2 - (1 + \varepsilon_\beta)^2 \right]}. \quad (3.92)$$

Очевидно, что $\sin^2 \varepsilon_{\alpha\beta} \leq 1$, тогда с учетом (3.92) получим квадратное неравенство относительно $(1 + \varepsilon_\beta)^2$

$$f(\varepsilon_\beta) = A(1 + \varepsilon_\beta)^4 + B(1 + \varepsilon_\beta)^2 + C \leq 0, \quad (3.93)$$

где

$$A = \frac{1}{\sin^2 2\varphi_0^{(1)}}; \quad B = -\frac{2}{\sin^2 2\varphi_0^{(1)}};$$

$$C = \frac{1}{\sin^2 2\varphi_0^{(1)}} - 1.$$

Корни уравнения $f(\varepsilon_\beta) = 0$ имеют вид

$$\varepsilon_{\beta 1} = \left(1 + \sin 2\varphi_0^{(1)} \right)^{1/2} - 1, \quad \varepsilon_{\beta 2} = -\left(1 + \sin 2\varphi_0^{(1)} \right)^{1/2} - 1,$$

$$\varepsilon_{\beta 3} = \left(1 - \sin 2\varphi_0^{(1)} \right)^{1/2} - 1, \quad \varepsilon_{\beta 4} = -\left(1 - \sin 2\varphi_0^{(1)} \right)^{1/2} - 1.$$

Анализировать допустимые диапазоны изменения деформаций ε_β будем методом интервалов. Проще всего это сделать на числовом примере.

Пусть $\varphi_0^{(1)} = 30^\circ$. Тогда

$$\varepsilon_{\beta 1} = 0,366; \quad \varepsilon_{\beta 2} = -2,366; \quad \varepsilon_{\beta 3} = -0,634; \quad \varepsilon_{\beta 4} = -1,366;$$

$$A = 4/3; \quad B = -8/3; \quad C = 1/3.$$

Результаты численной проверки неравенства (3.93) на интервалах показаны на рис. 3.31, из которого следует, что неравенство удовлетворяется при

$$\varepsilon_{\beta 3} \leq \varepsilon_{\beta} \leq \varepsilon_{\beta 1} \quad \text{и} \quad \varepsilon_{\beta 2} \leq \varepsilon_{\beta} \leq \varepsilon_{\beta 4}.$$

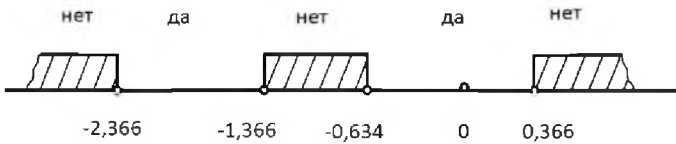


Рис. 3.31. Интервалы ограничений деформации ε_{β} ортогонально армированных тканей

Диапазон $\varepsilon_{\beta 2} \leq \varepsilon_{\beta} \leq \varepsilon_{\beta 4}$ не может быть реализован при деформации, так как в эту область из начального положения $\varepsilon_{\beta} = 0$ можно попасть только через «запретную» зону $\varepsilon_{\beta 3} \dots \varepsilon_{\beta 4}$. Таким образом, диапазон возможного изменения ε_{β} равен

$$\left(1 - \sin 2\varphi_0^{(1)}\right)^{1/2} - 1 \leq \varepsilon_{\beta} \leq \left(1 + \sin 2\varphi_0^{(1)}\right)^{1/2} - 1. \quad (3.94)$$

Соответствующие деформации ε_{α} на основании (3.76) находятся в диапазоне

$$\left(1 + \sin 2\varphi_0^{(1)}\right)^{1/2} - 1 \geq \varepsilon_{\alpha} \geq \left(1 - \sin 2\varphi_0^{(1)}\right)^{1/2} - 1. \quad (3.95)$$

На рис. 3.32 представлена диаграмма предельно возможных сочетаний деформаций ε_{α} и ε_{β} в зависимости от величины угла $\varphi_1^{(1)}$.

Максимальный диапазон изменения деформаций соответствует углу $\varphi_i^{(1)} = 45^\circ$, при этом теоретически деформации растяжения могут достигать 41,4 %, а сжатия 100 %. В этом плане данный угол является оптимальным

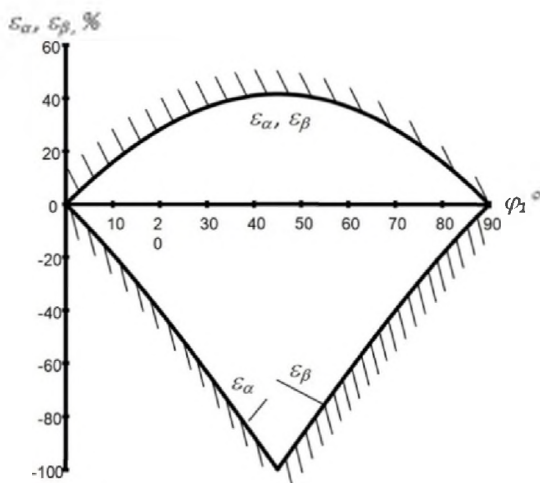


Рис. 3.32. Диаграмма предельных сочетаний деформаций $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$ для ортогонально армированных тканей

Подставляя предельные значения (3.94), (3.95) в формулы (3.82), (3.83), (3.89), найдем

$$\varepsilon_{12} = \mp \pi / 2 ; \quad \varepsilon_{21} = -1 ; \quad \psi_1 = 0; \pi ; \quad \psi_2 = \pi; 0 .$$

Таким образом, данные параметры также достигают своих предельных значений.

На рис. 3.33 приведены графики изменения деформаций ε_α и ε_{21} ортогонально армированных тканей в зависимости от деформации ε_β . Как уже отмечалось, график ε_α представляет собой часть окружности. Деформации ε_{21} приведены для начальных углов ар-

мирования $\varphi_0^{(1)} = 30^\circ, 45^\circ$. Для ортогонально армированных тканей ε_{21} всегда являются деформациями сжатия.

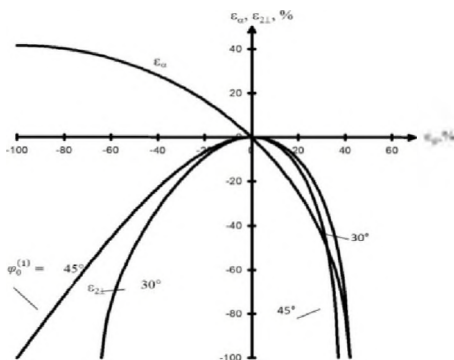


Рис. 3.33. Изменения деформаций $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_{21}$ ортогонально армированных тканей в зависимости от ε_β

На рис. 3.34. представлены графики распределения деформаций $\varepsilon_{\alpha\beta}$ и $\varepsilon_{12}^{(1)}$ для угла $\varphi_i^{(1)} = 30^\circ$ и $\varepsilon_{12}^{(1)}$ для угла $\varphi_i^{(1)} = 45^\circ$.

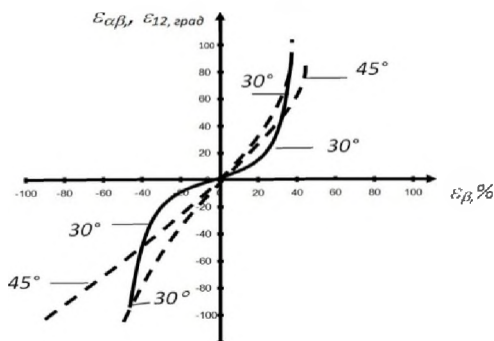


Рис. 3.34. Изменение сдвиговых деформаций $\varepsilon_{\alpha\beta}, \varepsilon_{12}$ ортогонально армированных тканей в зависимости от ε_β

Получим ограничения для биаксиальных нерастяжимых тканей. На основании 3.90 можно записать

$$1 + \varepsilon_\beta \leq \frac{1}{\sin \varphi_0}, \quad 1 + \varepsilon_\alpha \leq \frac{1}{\cos \varphi_0}.$$

Нижнее ограничение получим из физических соображений, рассматривая деформации элементарной ячейки, рис. 3.35.

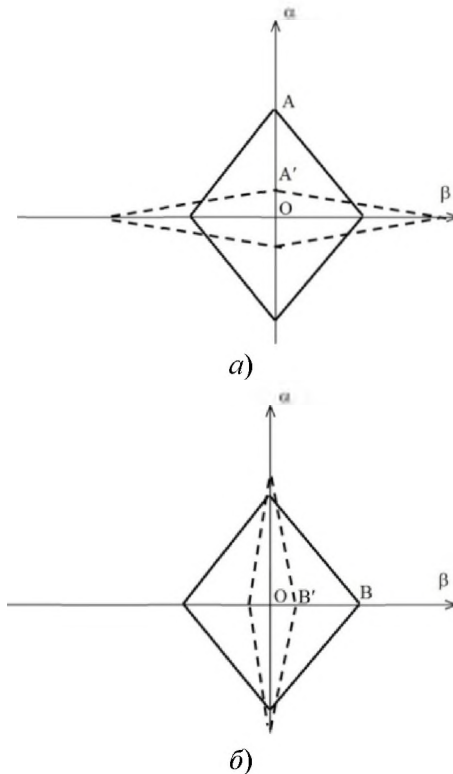


Рис. 3.35. Расчетные схемы для анализа ограничений на деформации биаксиальных тканей:
 а – сжатие оси $O\alpha$ и растяжение оси $O\beta$;
 б – растяжение оси $O\alpha$ и сжатие оси $O\beta$

Очевидно,

$$1 + \varepsilon_{\alpha} = \frac{OA'}{OA}$$

В пределе $OA' = 0$ и $\varepsilon_{\alpha} = -1$.

Соответственно

$$1 + \varepsilon_{\beta} = \frac{OB'}{OB}$$

и в пределе $\varepsilon_{\beta} = -1$.

Таким образом, деформации ε_{α} , ε_{β} ограничены диапазонами

$$-1 \leq \varepsilon_{\alpha} \leq \frac{1}{\cos \varphi_0} - 1; \quad -1 \leq \varepsilon_{\beta} \leq \frac{1}{\sin \varphi_0} - 1.$$

На рис. 3.36 представлена диаграмма, устанавливающая связь между деформациями ε_{α} и ε_{β} для биаксиальных симметричных тканей из нерастяжимых нитей с углами армирования $\varphi_i = \pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$. С помощью данной диаграммы можно графически определить угол армирования φ .

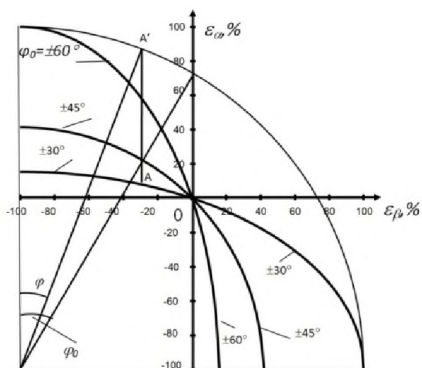


Рис. 3.36. Диаграмма соотношений между деформациями ε_{α} - ε_{β} биаксиальных тканей при углах армирования $\varphi_0 = \pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$

Представим уравнение эллипса (3.37) в параметрическом виде

$$\varepsilon_{\alpha} = a \sin t - 1, \quad \varepsilon_{\beta} = b \cos t - 1,$$

где t – параметр, равный углу между осью ε_{α} и лучом, проведенным из центра эллипса. Тогда на основании (3.78), (3.90) для области определения $t = \varphi$. В качестве примера рассмотрим эллипс при $\varphi_0 = 30$. Выберем на нем интересующую нас точку A и проведем вертикаль до пересечения с окружностью радиуса « b » (точка A'). Тогда искомый угол φ равен углу между лучом, направленным в точку A' и осью ε_{α} .

На рис. 3.37 приведены графики изменения сдвиговых деформаций в зависимости от деформаций ε_{β} для различных углов армирования φ_0 . Здесь использована зависимость для биаксиальных тканей между сдвиговой деформацией ε_{12} и деформацией ε_{β} в формуле (3.86).

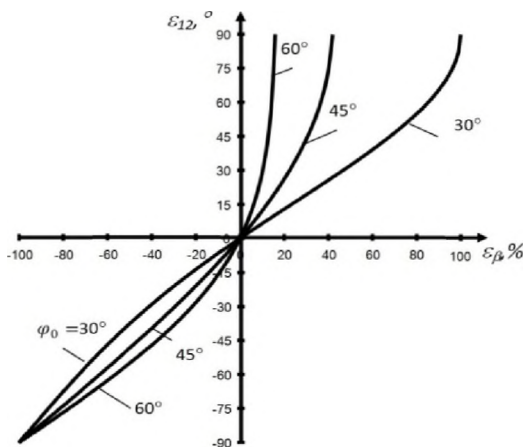


Рис. 3.37. Изменение сдвиговой деформации ε_{12} биаксиальной ткани в зависимости от ε_{β} при углах армирования $\varphi_0 = 30^\circ, 45^\circ$ и 60°

На рис. 3.38 представлены зависимости поперечных деформаций ε_{21} от ε_β . В отличие от тканей ортогонального армирования для неортогональных биаксиальных симметричных тканей при $\varphi_0 \neq \pm 45^\circ$, поперечные деформации ε_{21} могут быть растягивающими.

Определим максимальное значение для ε_{12} . Для этого найдем ε_{12} , выраженное через ε_β и φ_0 , путем проведения последовательно следующих операций. Из (3.85) найдем $(1 + \varepsilon_\alpha)^2$ и подставим в (3.80). Из полученного последнего равенства подставим $(1 + \varepsilon_\alpha)$ в (3.84). Значение для $\cos \varepsilon_{12}$ найдем из (3.86) и подставим в (3.84). В результате найдем

$$1 + \varepsilon_{21} = (1 + \varepsilon_\beta) \operatorname{tg} \varphi_0 \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \varphi_0} - (1 + \varepsilon_\beta)^2}. \quad (3.96)$$

Максимальное значение ε_{21} находится из условия равенства нулю частной производной, взятой по параметру ε_β . В результате из (3.96) найдем

$$\frac{\partial \varepsilon_{21}}{\partial \varepsilon_\beta} = \operatorname{tg} \varphi_0 \frac{\frac{1}{\sin^2 \varphi_0} - 2(1 + \varepsilon_\beta)^2}{\sqrt{\frac{1}{\sin^2 \varphi_0} - (1 + \varepsilon_\beta)^2}} = 0. \quad (3.97)$$

Условие (3.97) дает возможность определить значение

$$\varepsilon_\beta^* = \frac{1}{\sqrt{2} \sin \varphi_0} - 1,$$

при котором растягивающие поперечные деформации имеют максимальное значение

$$\varepsilon_{21}^* = \frac{1}{\sin^2 \varphi_0} - 1.$$

Нулевые значения деформации ε_{21} соответствуют $\varepsilon_\beta = 0$ и $\varepsilon_\beta = \operatorname{ctg} \varphi_0 - 1$.

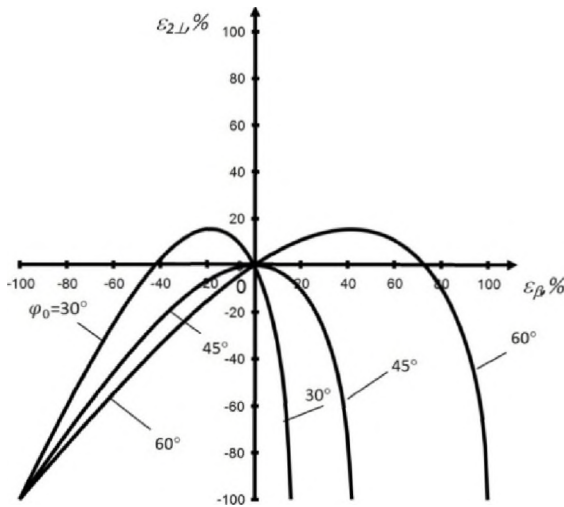


Рис. 3.38. Изменение поперечной деформации ε_{21} биаксиальной ткани в зависимости от ε_β при углах $\varphi_0 = 30^\circ, 45^\circ$ и 60°

Рассмотренная в данном разделе теория деформирования тканей не учитывает материальные параметры тканей – толщину нитей, плотность их упаковки, тип плетения и др. Учет этих параметров должен привести к дополнительным ограничениям на деформации тканей.

Литература

1. Альперин В.И. Применение стеклопластиков в химической промышленности в СССР и за рубежом / В.И. Альперин [и др.] // Сопоставительные обзоры по отдельным производствам химической промышленности: сб. науч.тр. / НИИТЭХИМ. – Москва, 1968.– вып.3. – С.3.
2. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1962. – 370 с.
3. Ваганов А.М. Проектирование корпусных конструкций из стеклопластика / А.М.Ваганов, П.А. Колмыков, М.А.Фрид. – М.: Судостроение, 1972. – 272 с.
4. Крагельский И.В. Развитие науки о трении / И.В. Крагельский, В.С.Щедров. – М.: изд. АН СССР, 1956.
5. Крагельский И.В. Трение волокнистых веществ / И.В.Крагельский. –М.: Гизлегпром, 1941.
6. Дерягин Б.В. Физико-химия нанесения тонких слоев на движущуюся подложку / Б.В.Дерягин, С.М. Левин. – М.: изд. АН СССР, 1959. – 391 с.
7. 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.
8. Горелый К.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния в торových оболочках, изготавливаемых из гетерогенных полимерных материалов: диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук: 26.10.12 / К.А. Горелый. – Минск, 2012. – 118 л.
9. Liu, L. Sherwood Two – dimensional macro-mechanics shear models of woven fabrics / L. Liu, J. Chen, X.Li, // Composites: Part A. – 2005. - v. 36. - P. 105 – 114.
10. Micromechanics and laminate analysis of textile fabric composites // Электронный ресурс]. - 2005. – Режим доступа: [http : // www. ncat. edu/ ccmradm/ ccmr/ mmtexlam. htm](http://www.ncat.edu/ccmradm/ccmr/mmtexlam.htm).
11. Potluri, P. Mechanics for non-orthogonal interlaced textile composites / P.Potluri, A. Manan // Composites: Part A. – 2006. - v. 38. – P. 1216 – 1226.

12. Zhu, B. Large deformation and slippage mechanism of plain woven composites in bias extension / B.Zhu, T. X. Yu, X.M. Tao // Composites: Part A. – 2007. - v. 38. - P. 1821 – 1828.

13. Launay, J. Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements / J.Launay, G.Hivet, A. Duong, P. Boisse // Composite Science and Technology. - 2008. - v. 68, № 2. -P. 506 – 515.

14. Boisse, P. Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite preforming / P. Boisse, B. Zouari, J. Daniel // Composite: Part A. – 2006. - v. 37. - P. 2201 – 2212.

15. Harrison, P. Shear characterization of woven textile composites / P. Harrison, M.J. Clifford, A.C. Long // [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.mech.gla.ac.uk / pharriso / publications / Conference / ECCM-10 paper.pdf](http://www.mech.gla.ac.uk/pharriso/publications/Conference/ECCM-10paper.pdf).

16. Grosberg, P. The mechanical properties of woven fabrics, part I / P.Grosberg, S. Konda // Text. Res. J. – 1966. - v. 36, № 1. - P. 71 – 79.

17. Кукин, Г.Н. Текстильное материаловедение : в 3 частях / Г.Н.Кукин, А.Н.Соловьев. - М.: Легпромбытиздат. – 1961. – Ч.1. - 304 с.

Научное издание

ВАСИЛЕВИЧ Юрий Владимирович
ГОРЕЛЫЙ Константин Александрович
САХОНЕНКО Владимир Моисеевич и др.

**МЕХАНИКА ПРЕПРЕГОВ –
РАСЧЕТ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АРМИРОВАННЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В 2 частях

Часть 1

Подписано в печать 11.11.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 17,21. Уч.-изд. л. 13,45. Тираж 100. Заказ 867.
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.