

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет)»

*На правах рукописи*

  
Евстратов Сергей Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
СВЕРХЛЕГКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ  
БАЛЛОНОВ ДАВЛЕНИЯ**

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор,  
заслуженный деятель  
науки и техники Воробей В.В.

Москва – 2015

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **ГЛАВА I. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ ДАВЛЕНИЯ**

- 1.1. Применение баллонов давления в различных отраслях промышленности
- 1.2. Применение баллонов давления в ракетно-космической промышленности

### **ГЛАВА II. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ НАМОТКИ БАЛЛОНОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

- 2.1. Технологические способы и схемы намотки
- 2.2. Технологические параметры процесса намотки
- 2.3. Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала
- 2.4. Исходные материалы для изготовления сверхлегких баллонов высокого давления
- 2.5. Оборудование для намотки.

### **ГЛАВА III. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ ОБОЛОЧЕК**

- 3.1. Определяющие технологические параметры метода намотки нитью.
- 3.2. Некоторые соображения по расчету параметров исполнительных органов намоточного станка
- 3.3. Методика выбора параметров траектории исполнительных органов станка
- 3.4. Особенности построения алгоритма расчета движения исполнительных органов станка

### **ГЛАВА IV. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВОЙ ОБОЛОЧКИ КОРПУСА БАЛЛОНА (ПРОЧНОСТИ, ЖЕСТКОСТИ), ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ НАМОТКИ**

- 4.1. Методика расчета оптимальных углов армирования и контуров днищ
- 4.2. Методика расчета прочности и жесткости силовой оболочки корпуса
- 4.3. Обеспечение процесса пропитки перемещающегося наполнителя (жгута, нити) в ванне со связующим. Расчет длины завершения пропитки

4.4.Расчеты силовой оболочки и циклической прочности баллона БК-7

4.5.Расчеты силовой оболочки и соображения о циклической прочности баллона БК-8

## **ГЛАВА V. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХЛЕГКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ ДАВЛЕНИЯ**

5.1.Типы лайнеров и методика контроля толщины стенки

5.2.Разработка типовой технологии изготовления металлокомпозитных баллонов давления типа БК-7 и БК-8

5.3.Описание технологии изготовления комбинированных баллонов давления БК-7 и БК-8

5.4.Изготовление и испытание металлокомпозитного баллона БК-7

5.5.Изготовление и испытание металлокомпозитного баллона БК-8

5.6.Исследования микроструктурных и технологических параметров изготовления материалов стеклопластиковой и углепластиковой силовых оболочек баллонов БК-7 и БК-8

5.7.Сравнительный анализ полученных результатов

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Библиографический список

## ВВЕДЕНИЕ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### **Актуальность темы**

В жидкостных ракетных двигателях и двигательных установках применяются баллоны высокого давления, которые служат бортовым аккумулятором газов высокого давления, необходимых для обеспечения работы жидкостного ракетного двигателя и двигательной установки, от момента запуска, до его останова, в части обеспечения функционирования агрегатов пневмоавтоматики, турбонасосного агрегата, а также для предпусковой и послепусковой продувки полостей агрегатов и трубопроводов двигателя.

Эти баллоны представляют собой полые шары из сваренных друг с другом полусфер. Полусферы изготавливаются штамповкой. В полусферы ввариваются штуцеры для заправки и выхода рабочего газа. Крепление баллонов на двигатели производится с помощью охватывающих сферу хомутов, или за штуцеры, или с помощью привариваемых к сферам крепежных элементов. Баллоны окрашиваются цветом, соответствующим наименованию содержащемуся в баллоне газу. Чертежное обозначение и порядковый номер баллона маркируется на его поверхности краской.

На Рисунке 1 приведена принципиальная пневмогидравлическая схема жидкостного ракетного двигателя без дожигания генераторного газа из которой видна необходимость использования баллонов высокого давления в целях обеспечения работоспособности ЖРД, изготовленного по этой схеме.

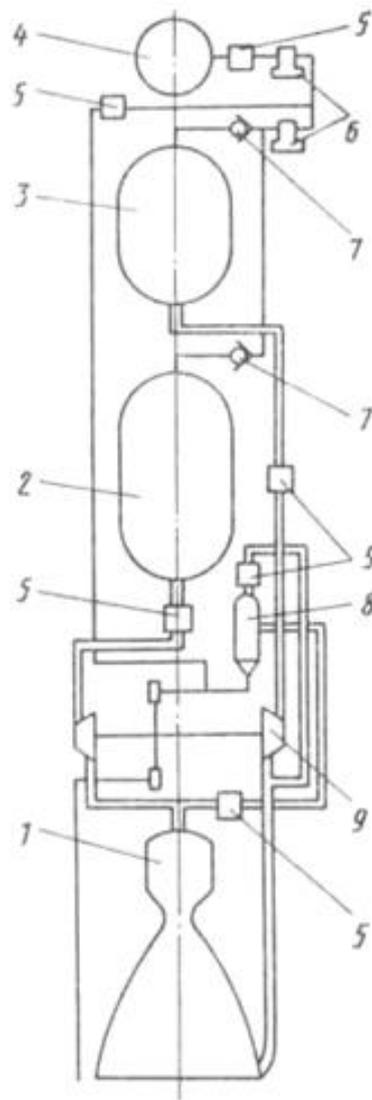


Рисунок 1. Схема двигательной установки с насосной системой подачи топлива без дожигания генераторного газа.

1 – камера сгорания, 2 - бак окислителя, 3 – бак горючего, 4 – баллон с газом, 5 – пусковой клапан, 6 – газовый редуктор давления, 7 – обратный клапан, 8 – газогенератор, 9 – турбонасосный агрегат.

Возможность целесообразности применения баллонов высокого давления из композиционных материалов была рассмотрена ОАО «КБ химавтоматики» в 80 – е годы прошлого столетия в качестве альтернативы по массе стальному баллону с  $V = 30$  л, применяемого в качестве аккумулятора давления ( $P=150$  кгс/см<sup>2</sup>) в двигателе 11Д122 для ракетно- космической системы «Энергия - Буран».

По заданию ОАО КБХА в ЦНИИМВ (ныне ОАО «Композит») было спроектировано и изготовлено несколько образцов из органопластика с внутренней резиновой оболочкой. Баллон содержал один штуцер. Испытания показали, что оболочка из органопластика при рабочем давлении растягивается и эластичности внутренней резиновой оболочки оказывается не достаточно для обеспечения герметичности баллона по гелию. Увеличение габаритов баллона под давлением также вызывало проблемы с его закреплением на двигателе.

Работы были прекращены в связи с закрытием темы «Энергия- Буран».

В современной ракетно-космической промышленности шар-баллоны, в которых под большим давлением (от 220 до 340 кгс/кв. см) хранится гелий, используются для работы пневматических систем жидкостных ракетных двигателей. Эти изделия применяют в ракетах типа "Протон", "Ангара-1.2" и "Ангара-А5", в разгонных блоках "Бриз" и "Фрегат", а также в новом кислородно-водородном разгонном блоке, испытания которого должны начаться в 2015 году.

Во всех фирмах, производящих баллоны высокого давления, по разному подходят к выбору конструкции и технологии изготовления. Поэтому в диссертации поставлена задача обобщить существующий опыт и разработать основы проектирования и порядок технологических операций изготовления сверхлегких металлокомпозитных баллонов давления (сверхлегкий баллон - герметичная металлокомпозитная конструкция минимального веса).

#### **Цели и задачи исследования**

- Подробный анализ существующих методов намотки и исследование этапов технологического процесса непрерывной намотки баллонов из композиционных материалов, в том числе технологические способы и схемы намотки, технологические параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала, оборудования для намотки
- Исследование определяющих технологических параметров намотки нитью, разработка рекомендации по расчету, выбору параметров траектории

намотки и алгоритмов расчета движения исполнительных органов станка.

- Разработка инженерной методики проектирования и расчета силовой оболочки корпуса сверхлегкого баллона на прочность и жесткость.
- Разработка комплекса методов проектирования конструкции и технологии производства сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов высокого давления.
- Анализ результатов отработки стеклопластикового баллона БК-7 и углепластикового баллона БК-8 с использованием различных конструкций и технологий изготовления металлических лейнеров.

### **Научная новизна**

Анализ и обобщение существующих методов изготовления баллонов из полимерных композиционных материалов и разработка на основе полученных результатов анализа технологии изготовления сверхлегких комбинированных баллонов высокого давления.

Предложено решение для комплексного метода проектирования технологии производства сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов высокого давления.

### **Теоретическая и практическая значимость проведенных результатов исследования**

Изучение и обобщение имеющихся сведений проектирования и эксплуатации баллонов, а также основ технологии намотки баллонов из композиционных материалов.

Расчеты основных параметров метода намотки нитью с использованием программного комплекса, а так же при помощи ранее изученных теоретических положений.

Проектирование и расчет нагрузки разрушения металлокомпозитных баллонов при помощи программного комплекса.

Экспериментальная реализация разработанного технологического процесса на производстве.

Разработаны методы конструкторско-технологического проектирования сверхлегких баллонов давления для различных отраслей ракетно-космической, авиационной и др. отраслей техники.

### **Методология и методы исследования**

В работе использованы теоретические методы исследования. Решения задач базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях технологии машиностроения, теоретической механики, теории сопротивления материалов и математического моделирования. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью разработанных математических моделей, их адекватностью по известным критериям оценки изучаемых процессов, использованием известных положений фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с данными эксперимента и результатами промышленной эксплуатации созданного технологического оборудования, а также с результатами исследований других авторов.

### **На защиту выносятся**

Алгоритм расчета движения исполнительных органов намоточного станка при изготовлении комбинированного облегченного баллона высокого давления.

Инженерная методика проектирования и расчета силовой оболочки корпуса баллона из полимерных композиционных материалов на прочность и жесткость.

Комплексный метод проектирования технологии производства сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов высокого давления.

### **Степень достоверности работы**

Результаты работы внедрены на ОАО “Композит” в виде технологической и проектно-конструкторской документации по разработке и созданию

сверхлегких и сверхпрочных баллонов давления (заключение экспертной комиссии о состоятельности ТП)

### **Апробация результатов работы и публикации**

Результаты работы были изложены на:

1. Доклад на XIII международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, 2007 г.

2. Доклад на XIV международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, 2008 г.

3. Доклад на XV международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, 2009 г.

По теме диссертации опубликованы две печатных работы в рецензируемом журнале, входящем в перечень ВАК.

## ГЛАВА 1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ ДАВЛЕНИЯ

### 1.1. Применение баллонов давления в различных отраслях промышленности

Проведенный автором анализ истории использования баллонов высокого давления [1, 5, 8, 10, 22, 30, 33, 47, 51, 63, 81, 82], показал, что уже в начале развития техники выявилась необходимость в таких баллонах для использования энергии сжатого воздуха в целях обеспечения торможения железнодорожного подвижного состава. Необходимость использования энергии сжатых газов была востребована при изготовлении вооружения и военной техники, как, например, в первых конструкциях огнеметов использовалась энергия сжатого воздуха который накачивался насосом в специальную емкость, с помощью которой огнемет выполнял свои боевые функции.

С развитием техники повышались требования к баллонам высокого давления и, как показывает практика, они должны обеспечивать следующие преимущества перед традиционными стальными баллонами [70]:

- снижение массы в 1,5 – 2 раза;
- повышенные прочность, износоустойчивость, антикоррозионные свойства, ударостойкость;
- увеличенную безопасность, а именно: высокую степень взрывобезопасности, отсутствие осколков при превышении допустимого давления;
- возможность применения с различными типами газов и удобство эксплуатации.

Все эти требования соответствуют металлокомпозитные баллоны высокого давления.

В настоящее время металлокомпозитные баллоны высокого давления востребованы в различных отраслях промышленности, а именно:

- в автомобильной отрасли для перевода автомобильного транспорта на газовое топливо и, как следствие, создание сети газонаполнительных компрессорных станций;

- в атомной промышленности для хранения жидких радиоактивных отходов и при работе в составе комбинированной энергетической установки, как источника аварийного питания включая атомные электростанции и другие различные службы;

- в энергетической отрасли металлокомпозитные баллоны находят применение в составе комбинированных энергоустановок, как источник аварийного питания для нужд малой энергетики;

- в сельском хозяйстве естественно востребованы металлокомпозитные баллоны для перевода на газ сельскохозяйственной техники, а также при работе комбинированных энергоустановок в составе биоэнергетических систем сельскохозяйственного назначения;

- в нефтегазовой отрасли металлокомпозитные баллоны востребованы для транспортировки газов, утилизации попутного нефтяного газа с применением свободнопоршневого двигателя, а также производства электроэнергии на местах добычи с использованием комбинированной энергетической установки, что снижает затраты на обеспечение всех видов работ в местах добычи, транспортировки и обслуживания нефти – и газопроводов;

- в судостроительной промышленности металлокомпозитные баллоны высокого давления используются во многих технологических системах кораблей и подводных лодок, а также, естественно, востребованы конструкторами подводного снаряжения. Кроме того на флоте используются комбинированные воздухонезависимые энергоустановки в составе которых используются рассматриваемые в данной работе баллоны;

- на железнодорожном транспорте нашли применение этих баллонов, как и при переводе железнодорожного подвижного состава на газ, использование его в комбинированных энергетических установках, так и использовании

кислородного аппарата спасателя, в котором неотъемлемой частью конструкции является наличие легкого металлокомпозитного баллона.

Особое место занимает использование легких металлокомпозитных баллонов в их применении в здравоохранении и их использовании в критических ситуациях.

Сегодня здравоохранением востребованы легкие и компактные индивидуальные кислородные металлокомпозитные баллоны для лечения тяжелобольных, в том числе астматических и др.

В России разработан кислородный аппарат спасателя (КАС - 01) для оказания неотложной медицинской помощи пациентам в пути следования, например, на железнодорожном транспорте при сердечной недостаточности и астматических приступах. Кроме того проведены клинические испытания специального кислородного аппарата «Аккумулятор кислорода АК – 14», предназначенный для кислородной терапии пациентов, которым по показаниям врачей необходимо дышать воздухом, обогащенным кислородом до 35 – 40%.

Кислородный аппарат спасателя нашел свое применение, кроме его использования на железнодорожном транспорте, также при проведении спасательных работ отрядами Министерства по чрезвычайным ситуациям, пограничными службами Федеральной службы безопасности Российской Федерации и воинскими подразделениями Министерства обороны Российской Федерации. А именно:

Специфика работы спасательных отрядов МЧС, обеспечивающих спасение людей в горах, заключается в быстром прибытии в район поиска. Как правило, отряды базируются в лагерях на уровне моря, доставка к месту поиска осуществляется вертолётom, что полностью исключает возможность адаптации организма спасателя к уменьшенному количеству кислорода в высокогорье.

После прибытия в район поиска в течение 1-2 часов не адаптированный организм спасателя расходует собственные кислородные резервы, потом наступает вялость, апатия ко всему происходящему, физическая невозможность выполнять поставленную задачу по спасению потерпевших.

Спасательные работы в районе поиска обычно ведутся продолжительное время, так как требуется быстрое нахождение и спасение людей, поэтому существует необходимость восполнить недостаток кислорода в организме спасателей.

По условиям применения КАС-01 позволяет осуществлять мероприятия по поиску и эвакуации пострадавших до 10 часов при максимальном расходе кислорода равным 4 литра в минуту (баллон ёмкостью 4 литра давление 300 атм, запас медицинского кислорода с точкой росы – 35 °С составляет 1000 литров). Запаса кислорода при максимальном расходе кислорода 4 литра в минуту хватает на пять часов работы от одного баллона. В комплект КАС-01 входит два баллона. Общий запас кислорода в двух баллонах позволяет осуществлять напряжённую физическую работу в течение 10 часов. Запаса кислорода при расходе 2 литра в минуту хватает на 20 часов поисковой работы.

Важным условием эксплуатации КАС-01 является наличие режима сна и отдыха при объёме потребления кислорода 0,5-1 литр в минуту. В таком режиме запасов кислорода хватает на 40 часов.

Комплект КАС-01 имеет малый вес 4 кг и неприхотлив в эксплуатации.

Как показывает практика, кислородная терапия необходима не только спасателям, осуществляющим оперативный поиск пострадавших, но и непосредственно пострадавшим.

Пострадавший, находившийся на высокогорье при низкой температуре без движения длительное время, остро нуждается в кислородной терапии для насыщения крови кислородом и начала в его крови окислительно - восстановительной электрохимической реакции, позволяющей восстановить кровоснабжение мозга и насыщение тканей кислородом.

Применение КАС-01 решает задачи пограничных служб ФСБ РФ и частей МО РФ, выполняющих работы на высокогорье. Сотрудники пограничной службы и частей МО РФ находятся в состоянии постоянной боевой готовности, имеют высокую физическую готовность и, как правило, расположены в местах высокогорья. Необходимо иметь необходимое количество КАС-01 в комплекте

медицинской службы этих отрядов, работающих на высокогорье, для обеспечения оперативности эвакуации раненых и пострадавших. Оперативная кислородная терапия в полевых условиях позволяет сохранить физиологические функции организма, увеличить выносливость и повысить вероятность доставки раненого или пострадавшего бойца в стационарный госпиталь.

В стационарных условиях все проблемы связанные с кислородным обеспечением давно решены, однако стационарное оборудование имеет большой вес, сложность в эксплуатации и не приспособлено для применения в полевых условиях.

## 1.2. Применения баллонов давления в ракетно-космической промышленности

В ракетно–космической технике необходимы емкости для хранения рабочих тел (окислителя и горючего), а также газов для обеспечения функционирования всей пневмогидравлической системы ракеты и двигательных установок. Любая двигательная установка начинается с пневмогидравлической схемы (ПГС). То есть, как видно из названия, во время работы двигательных установок по этой схеме в них используются газы в сжатом виде и жидкости. Газы на борту ракеты-носителя, разгонного блока, космического аппарата, тормозной двигательной установки, электроракетной двигательной установки, объединенной двигательной установки, жидкостного ракетного двигателя, особенно жидкостных ракетных двигателей малых тяг и т.д. находятся в сжатом виде в емкостях. Как правило, это азот, гелий, ксенон и т.д., которыми заполняются шарбаллоны под давлением порядка  $200 - 250 \text{ кг/см}^2$ .

В жидкостных ракетных двигателях для ракетной техники различного назначения применяются баллоны высокого давления  $P_{\text{раб.}}=200-250 \text{ кгс/см}^2$ , в которых рабочим телом являются азот или гелий. Основное назначение баллонов высокого давления жидкостных ракетных двигателей – служить аккумуляторами газа высокого давления необходимого для срабатывания

агрегатов пневмоавтоматики, а также для продувки внутренних полостей агрегатов двигателей во время работы и после остановки. В настоящее время в составе ЖРД используются шарбаллоны объемом от 1,5 до 20 литров изготовленные из металла и поэтому имеют значительный вес.

Автором настоящей работы изучено 80 патентов на изобретения, как российских, так и зарубежных, касающиеся конструкции, технологии изготовления металлокомпозитных баллонов и проведен их анализ в части касающейся выполненной работы.

Кроме того, автор ознакомился с 29 предприятиями и организациями, в том числе, с 13 зарубежными фирмами, занимающимися разработкой и изготовлений металлокомпозитных баллонов давления, а именно:

- Отечественных фирм: «НПО «Поиск» (г. Санкт-Петербург), ГНПП «Сплав» (г. Тула), «Реал-Шторм» (г. Ижевск), «Элина-Т» (г. Москва), «Орский машиностроительный завод» (г. Орск), «Ярпожинвест» (г. Ярославль), «Механический завод» (г. Орск) – производство баллонов высокого давления, используемых для хранения и транспортировки сжатых газов, которые применяются в авиации, космосе, автотранспорте, нефтепереработке, медицине, противопожарном, спортивном и другом снаряжении; «Газкомпозит» (г. Пермь), «Оргэнергогаз» (г. Видное Московской области) – производство вставок электроизолирующих для магистральных трубопроводов в нефтехимической промышленности, «Балсити» (г. Москва) – производство автомобильных баллонов для сжиженного углеводородного газа, «Плазмформ» (г. Москва) – производство баллонов высокого давления, применяемых для теплообменных устройств, промышленного холодильного оборудования и кондиционирования воздуха, оборудования для фильтрации и очистки газов; «Казанское опытное конструкторское бюро «Союз» (г. Казань) – применение баллонов высокого давления в производстве авиационных газотурбинных реактивных двигателей, «Котласский электромеханический завод» (г. Котлас)- выпуск баллонов для газомоторного топлива на основе

метана (СПГ, LNG). Металлопластиковые баллоны выпускаются емкостью 35, 50, 65, 80 литров в цилиндрическом исполнении, «ЦНИИСМ» (г. Хотьково) – является ведущим предприятием России в области проектирования и производства конструкций из современных полимерных композитных материалов для ракетно-космической техники, транспортного, энергетического, нефтехимического машиностроения и других отраслей промышленности.

- Зарубежных фирм: «LuxferGasCylinders» (Великобритания, США, Франция), «PTI» (США), «EF1C» (США), «StructuralCompoIndustries» («SCI») (США), «SkottAviation» (США), «MSAAUERGmbH» (Германия), «EurocylinderSystemsGmbH» (Германия), «DraegerSafetyAG&Co. GKA» (Германия), «Heiser» (Австрия), «Worthington Cylinders GmbH» (Австрия), «Faber Industrie S. p. a.» (Италия), «Kompozit-Praha»(Чехия), «VitkoviceLahvarna a. s.»(Чехия).

При работе жидкостных ракетных двигателей (Рисунок 1), энергия сжатого газа используется для обеспечения работы узлов и агрегатов электропневмоавтоматики ЖРД РД-0124 (рис 1.2.1), для обеспечения запуска двигателя и продувки трубопроводов горючего и камер сгорания (рис 1.2.2), а также в некоторых конструкциях турбонасосных агрегатов (ЖРД НК – 33, (рис 1.2.3-1.2.4) для продувки разделительных полостей окислителя и горючего, и конечно же, для обеспечения работы ЖРД МТ работающих по вытеснительной схеме подачи топлива (рис 1.2.5).

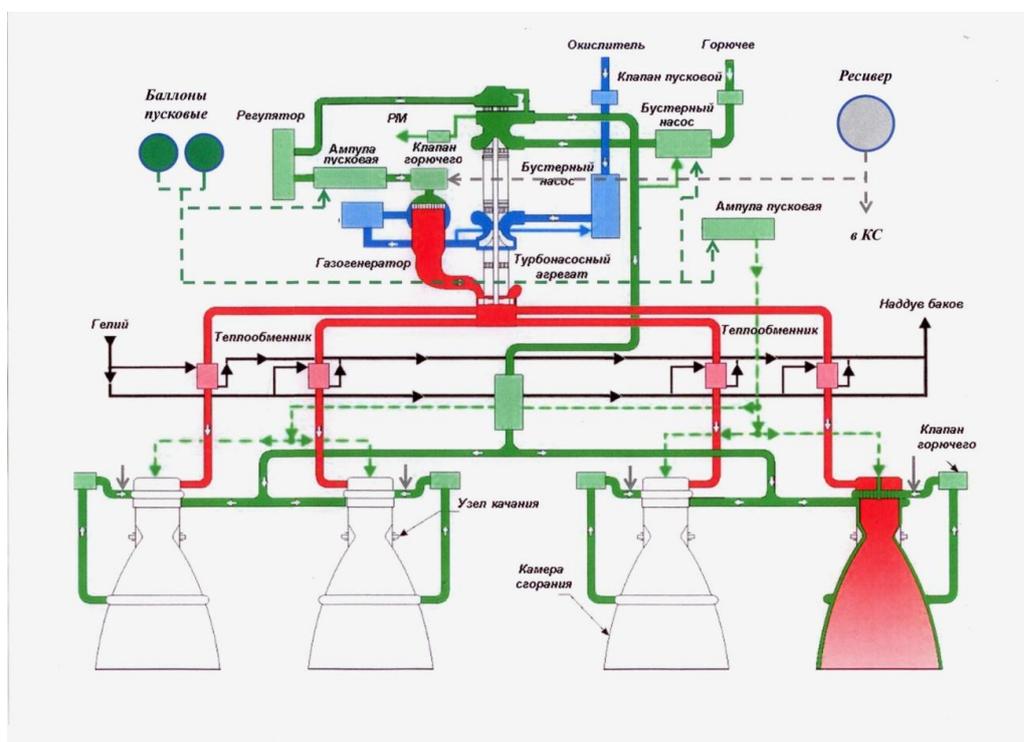


Рис.1.2.1 Принципиальная ПГС двигателя РД-0124 для III ступени РН «Союз 2 – 1б» с основными узлами и агрегатами

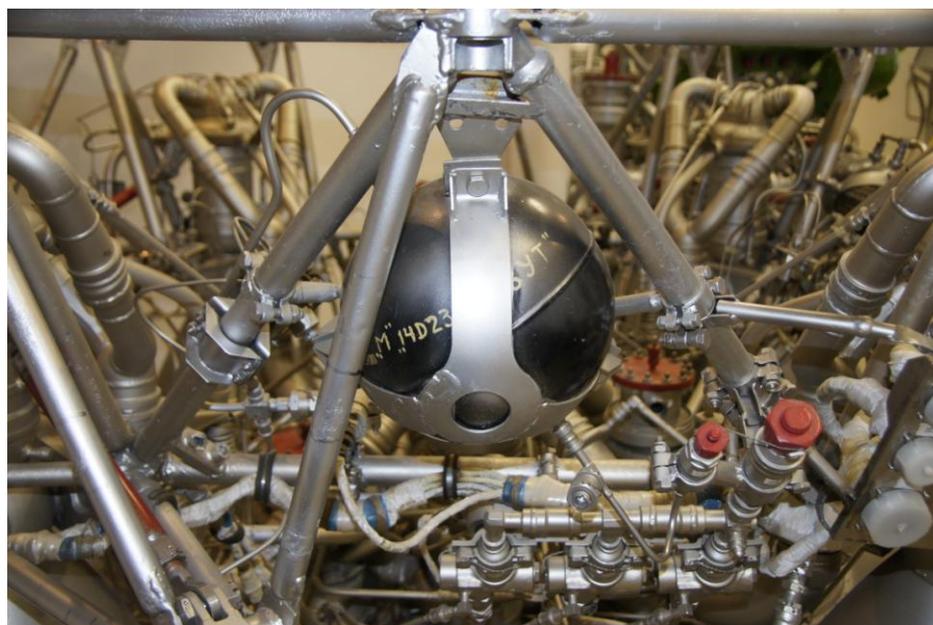


Рис.1.2.2 Расположение ресивера на двигателе РД-0124 для III ступени РН «Союз 2 – 1б»

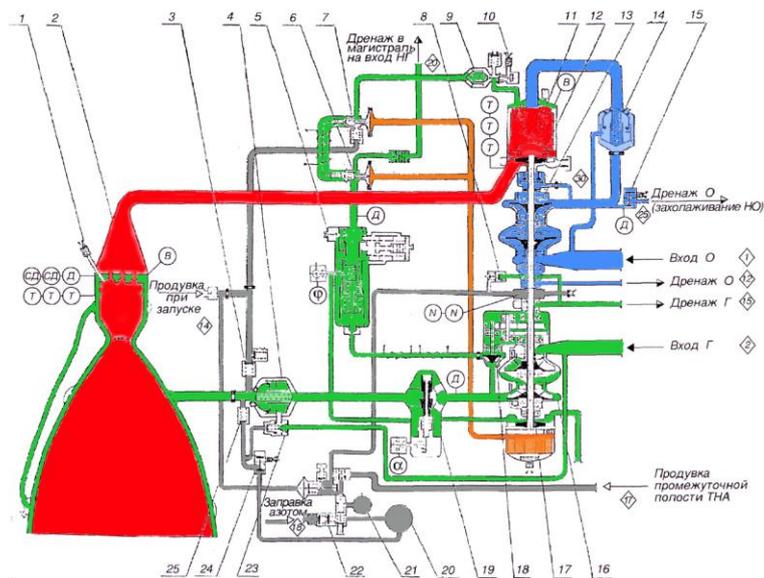


Рис.1.2.3 Пневмогидравлическая схема двигателя НК-33:

1 – пиросвечи; 2 – камера сгорания; 3 – продувочный клапан; 4 – клапан горючего Г-1; 5 – регулятор расхода с электроприводом по линии горючего в газогенератор; 6 – клапан горючего Г-4; 7 – клапан горючего Г-3; 8 – регулятор давления; 9 – клапан горючего Г-2; 10 – пирозатвор; 11 – газогенератор; 12 – турбонасос; 13 – насос окислителя ТНА; 14 – клапан окислителя О-2; 15 – дренажный клапан; 16 – насос горючего ТНА; 17 – пиротурбины; 18 – дополнительный насос горючего высокого давления; 19 – дроссель с электроприводом по линии подачи горючего в камеру сгорания; 20 – баллон азота-250 Атм; 21 – баллон азота; 22 – клапан вентиляции промежуточной полости ТНА; 23 – клапан управления; 24 – пироклапан; 25 – продувочный клапан



Рис.1.2.4 Внешний вид двигателя НК-33 для первой ступени РН “Союз-2-1в”

Кроме того, во всех двигательных установках, использующих жидкостные ракетные двигатели малых тяг и электрореактивные двигатели для хранения рабочих тел (амила, гептила, ксенона и др.) используется баллоны высокого давления(рис 1.2.3).

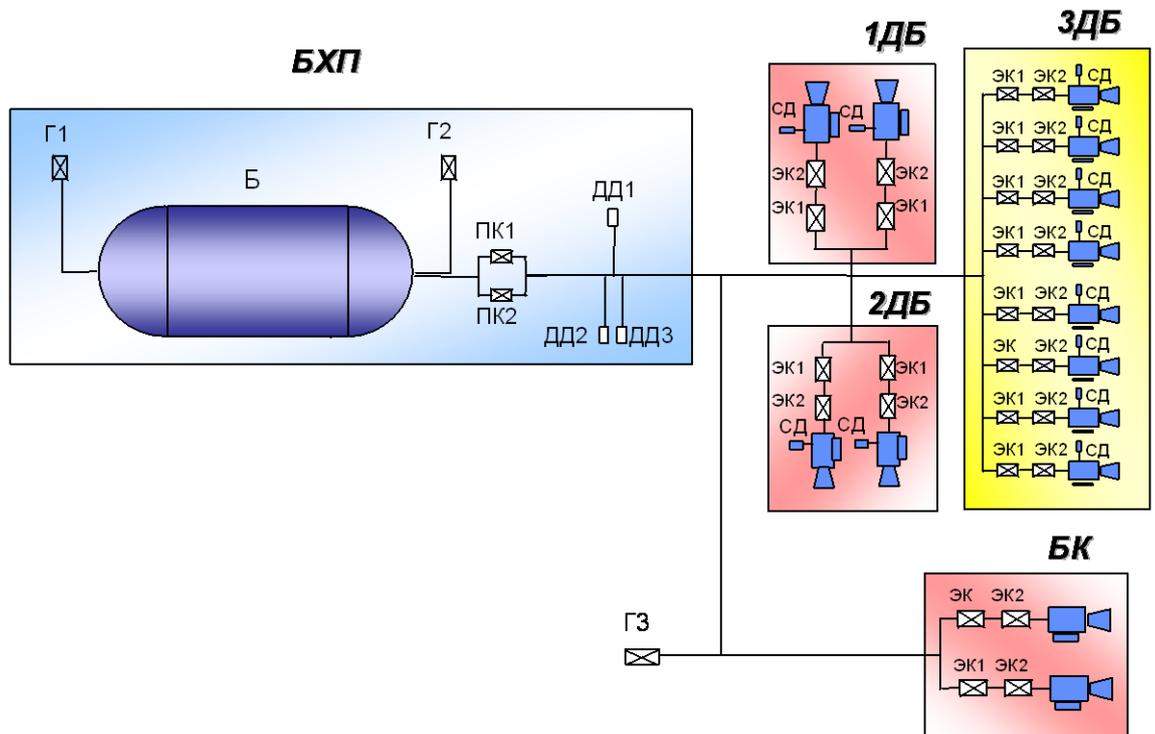


Рис.1.2.5 Типовая схема ДУ с ЖРДМТ:

БХП-блок хранения и подачи РТ; Б - бак для хранения РТ; Г1, Г2-горловины; ПК1, ПК2 – пироклапаны; ДД1-ДД3 – датчики давления; 1ДБ-3ДБ – блоки ориентации; БК – блок коррекции

Особо следует отметить перспективу использования металлокомпозитных баллонов при поагрегатной огневой доводки жидкостных ракетных двигателей на стендах: например, при огневых испытаниях камер сгорания и газогенераторов, при отсутствии турбонасосного агрегата. В имеющихся в настоящее время на испытательных станциях металлических баллонах можно иметь максимальное давление 300-400 атм, а металлокомпозитных баллонах давления в 2-2,5 раза больше.

Кроме того, перспективным направлением использования металлокомпозитных баллонов давления представляется их использование, как для хранения, так и для транспортировки газообразного водорода при давлениях 700-800 и выше атмосфер, что позволит значительно снизить его потери, при его хранение и транспортировки в жидком состоянии.

Вопрос о целесообразности внедрения баллонов из композиционных материалов был рассмотрен в ОАО «КБ Химавтоматики» в 80 годах прошлого столетия в качестве альтернативы стальному баллону, применяемого в качестве аккумулятора давления ( $P_{\text{раб.}}=150 \text{ кгс/см}^2$ ) на двигателе РД 0120 используемого в ракетно-космической системе (Энергия-Буран).

Положительным эффектом этого опыта явилось подтверждение возможности снижения массы баллона (примерно на 4-6 кг) и обеспечение безопасности взрыва при аварии.

В настоящее время, одним из основных требований предъявляемым к перспективным жидкостным ракетным двигателям и энергетическим установкам является обеспечение их минимальных массовых характеристик.

Перспективным направлением снижения массы жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок ракет, разгонных блоков, космических аппаратов и самих ракет при сохранении прочностных свойств баллонов является применение металлокомпозитных баллонов. Использование металлокомпозитных баллонов взамен металлических позволит значительно уменьшить массу жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок ракет, разгонных блоков, космических аппаратов и самих ракет при сохранении вместимости баллонов, что приведет к снижению общей массы разрабатываемой конструкции и, как следствие к увеличению выводимой полезной нагрузки, цена которой по сведениям из различных источников по состоянию на 01.01.2015 г. составляла от \$ 3,0 до 5,0 тысяч долларов за один килограмм полезной нагрузки на опорную (околоземную) орбиту, от \$ 12,0 до 15,0 тысяч долларов за один килограмм полезной нагрузки на переходную геостационарную орбиту и от \$22,0 до \$27,0 тысяч долларов за один килограмм полезной нагрузки на геостационарную орбиту. Если эти цифры умножить на количество запусков (20-25 запусков типа РН «Союз»), то получается сумма порядка 600-700 тысяч долларов за один кг полезной нагрузки в год.

Надо отметить, что на всех предприятиях по разному подходят к выбору конструкции и технологии изготовления металлокомпозитных баллонов.

Поэтому в диссертации поставлена задача обобщить существующий опыт и разработать основы проектирования и порядок технологических операций изготовления сверхлегких металлокомпозитных баллонов давления (сверхлегкий баллон - герметичная металлокомпозитная конструкция минимального веса).

## ГЛАВА II. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ НАМОТКИ БАЛЛОНОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Получение конструкции методом намотки явилось подлинным прогрессом в технологии производства изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Это закономерно, поскольку метод намотки позволил получить высокопрочные материалы в конструкциях аэрокосмической и ракетной техники и включает в себе большие возможности совершенствования, многие из которых сегодня реализованы [1,17,30,51,56,70,80,81].

Намотка - технологический процесс, при котором непрерывный армирующий наполнитель в виде нитей, лент, жгутов, тканей пропитывается полимером связующим и подаётся на оправку, имеющую конфигурацию внутренней поверхности. После получения необходимой схемы армирования, заданной толщины и структуры материала стенки производится отверждение изделия тем или иным способом и удаление оправки. Иногда оправка может быть элементом наматываемой конструкции, например, герметизирующей оболочкой.

Методом намотки изготавливаются изделия, имеющие форму тел вращения: баллоны давления, баки, корпуса ракетных двигателей, головные части, отсеки ракет, транспортно-пусковые контейнеры, корпуса подводных аппаратов, стволы орудий и корпуса снарядов, жидко наливные цистерны, трубопроводные магистрали, коробчатые шпангоуты, воздухосборники самолётов, лопасти винтов вертолётов, различные профили, пространственно изогнутые трубы и т.д.

Основным элементом перечисленных конструкций является силовая оболочка. Структура материала стенки оболочки создаётся в результате намотки  $n$ -го количества слоев, которые образуют узор намотки или схему армирования оболочки [80,81].

Технология изготовления изделий из ПКМ методом намотки имеет ряд преимуществ по сравнению с другими известными методами переработки композитов в изделиях. Важнейшим из этих преимуществ является, во-первых, возможность наиболее полной реализации в изделиях высокой прочности при растяжении волокон, составляющих намоточный материал, а во-вторых, возможность обеспечения высокой степени автоматизации подобного процесса, изготовления изделий на станках с программным управлением.

Наиболее эффективна укладка волокон и нитей в направлении действий главных напряжений, появляющихся в материале, вследствие действий силовых нагрузок, а также, если эти волокна одинаково натянуты и прочно скреплены между собой. Одинаково натянутыми волокна оказываются лишь при намотке нитей на тела, имеющие выпуклую поверхность типа цилиндра, сферы, овалоида, изотенсоида, тора и других им подобных, называемых телами вращения [80]. Создание конструкций из композитных материалов неразрывно связано с созданием самого материала, параметры которого в основном зависят от относительного и абсолютного соотношения между волокнистым и изотропным (полимерной матрицей) компонентами, и рисунка укладки волокнистого материала в структуре создаваемой конструкции. То есть, создание конструкций из волокнистых композиционных материалов неразрывно связано с одновременным созданием материала и технологий их изготовления. Причем технология изготовления конструкции существенно влияет на механические и физические характеристики получаемого композиционного материала и на конструктивные параметры создаваемого изделия.

Непрерывная намотка волокон (или ленты из волокон) производится на оправку, которая обычно имеет конфигурацию внутренней поверхности будущей конструкции. Волокна при намотке укладываются с определенным натяжением, что обеспечивает "прямолинейность" волокон и плотную укладку. Как правило, намотка производится путем автоматической укладки волокон, что обеспечивает стабильность выходных прочностных, физических и

геометрических параметров получаемой конструкции. Использование данного способа создания конструкций из ПКМ позволяет ставить задачи их оптимизации еще в процессе проектирования [28,31,39,47,51,52,56,67,70,72,73,80].

Как правило, метод намотки позволяет реализовать рисунки укладки волокон, находящихся в классе не соскальзывающих линий на поверхностях, описывающих форму будущего изделия. Такими линиями, как правило, являются геодезические линии на поверхности, либо линии на поверхности обеспечения устойчивости за счет трения наматываемой ленты на заданной поверхности [80,81].

## 2.1. Технологические способы и схемы намотки

Как известно, в зависимости от способа нанесения связующего на волокнистый армирующий материал и обеспечения необходимого содержания его в материале конструкции различают несколько технологических способов формования изделий намоткой.

Способ "сухой" намотки заключается в том, что волокнистый армирующий материал перед формованием предварительно пропитывают связующим и подсушивают на пропиточных машинах. Последние обеспечивают не только качественную пропитку, но и требуемое равномерное содержание связующего в препреге (полуфабрикате с неполным циклом отверждения) на основе стекло-, органо- и углеволокон за счет применения различных растворителей для регулирования вязкости связующего в процессе пропитки, а также требуемое его вязко-текучее состояние. Особенно эффективно применение предварительно пропитанных ровингов, полотен стекло-, углетканей и лент. Схема намотки изделия препрегом на станке с программным управлением приведена на рис. 2.1.1 Для программной намотки изделия в зависимости от его сложности применяют от 3 до 5 координат управления перемещением раскладочного устройства (головки).

При использовании способа "сухой" намотки улучшаются условия и культура производства, повышается в 1,5-2 раза производительность процесса намотки, появляется возможность использования практически любого связующего: эпоксидного, эпоксифенольного, фенолформальдигидного, полиамидного и др.

Способ "мокрой" намотки (рис. 2.1.2) отличается тем, что пропитка волокнистого армирующего наполнителя связующим и намотка на оправку совмещены. При намотке нити, предварительно подсушенные горячим воздухом, попадают из шпулярника на индивидуальные натяжители, собираются в прядь и поступают на пропиточно-натяжной тракт. Пропитка армирующего волокнистого материала связующим осуществляется одним из следующих способов: протягивание нитей через ванночку со связующим; контактирование с роликом, купающимся в связующем, принудительная пропитка в клиновой или вакуумной камере.

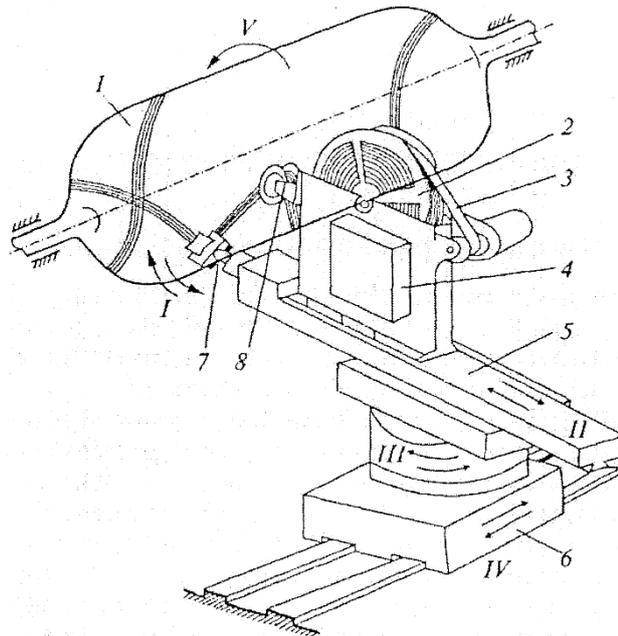


Рис. 2.1.1 Схема "сухой" намотки изделия препрегом:

1 - оправка; 2 - бобина с препрегом; 3 - разделительная пленка; 4 - нагреватель; 5 - суппорт; 6 - каретка; 7 - головка раскладчика; 8 - устройство натяжения;

I-V - степени подвижности (свободы) станка

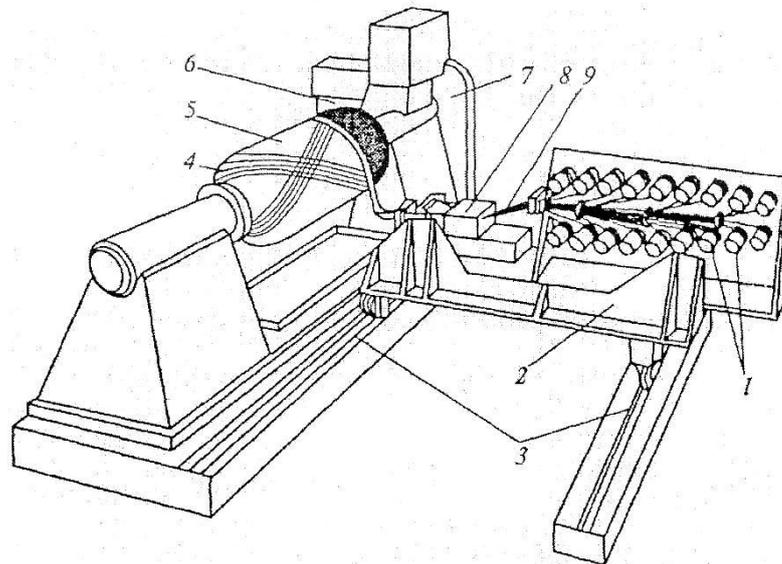


Рис. 2.1.2 Схема мокрой намотки:

1 - шпули с нитями; 2 - шпулярник; 3 - направляющие перемещения намоточно-пропиточного тракта; 4 - спиральные слои; 5- оправка; 6 - окружные слои; 7 - привод вращения; 8 - ванночка со связующим; 9 - сформированная пряжа

После пропитки излишек связующего отжимается, пряжа нитей натягивается, проходит через систему контроля натяжения и через раскладывающее устройство (раскладчик) поступает на вращающуюся оправку, укрепленную на намоточном станке. Необходимая вязкость связующего в данном случае обеспечивается выбором соответствующей смолы и применением подогрева связующего в пропитывающей ванне. Преимущество способа "мокрой" намотки заключается в более низком контактном давлении формования, что требует оборудования с меньшей мощностью привода и лучшей формуемостью поверхности изделия. Поэтому способ "мокрой" намотки применяют, как правило, для изготовления крупногабаритных оболочек сложной конфигурации.

Существует и третий способ намотки, при котором сухой армирующий материал наматывается на оправку, а затем пропитывается связующим путем разбрызгивания его под давлением из пульверизатора, вручную с помощью кисти, с использованием давления или вакуума. Этот способ, называемый намоткой с последующей пропиткой, ограниченно применяют при изготовлении панелей сетчатой структуры или тонкостенных оболочек,

поскольку обеспечить качественную пропитку известными способами не удастся. Решить проблему пропитки толстостенных изделий можно при применении метода скоростного вакуумирования, при котором первоначально удастся убрать с поверхности волокон технологические примеси, полностью удалить воздух из оболочки, образованной волокнами, а затем "ударом" атмосферного давления пропитать изделие равномерно по всей толщине. Схема такого процесса приведена на рис. 2.1.3 [5].

Способ "мокрой" намотки [5] характеризуется следующими показателями: невысокая скорость намотки, ограниченная скоростью пропитки наполнителя связующим; невозможность обеспечения равномерного содержания связующего по толщине наматываемого изделия (особенно для толстостенных конструкций); большое количество отходов связующего в виде загустевших остатков в пропиточной ванне и выдавленного излишка связующего из наматываемого изделия; загрязнение намоточно-пропиточного тракта и рабочего места связующим; невозможность применения высоковязких связующих (например, термопластов).

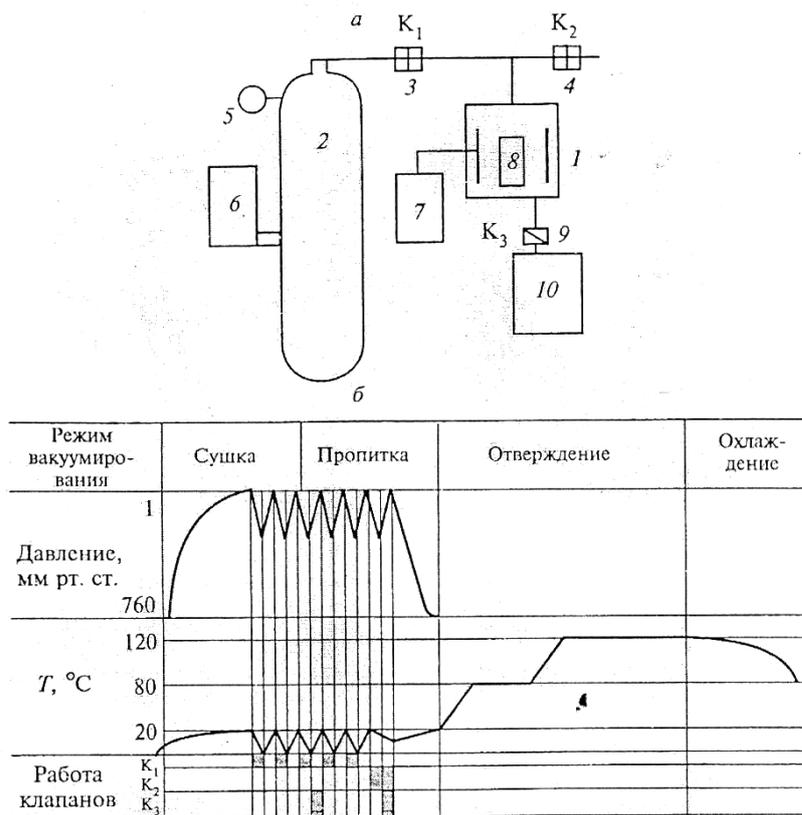


Рис. 2.1.3 Схема установки скоростной вакуумно-термической пропитки и отверждения изделий из композиционных материалов:

1 - рабочая камера; 2 - ресивер; 3,4 - скоростные вакуумные клапаны для соединения с ресивером и атмосферой; 5 - вакуумметр; 6 - вакуумный насос;

7 - блок нагрева и регулирования температуры; 8 - изделие;

9 - клапан для впуска связующего; 10 – емкость со связующим

Способ "сухой" намотки эффективнее "мокрой" и его преимущества заключаются в следующем: высокая производительность, так как скорость намотки не лимитируется условиями пропитки наполнителя; стабильность степени армирования, т.е. соотношения наполнитель - связующее; высокая воспроизводимость физико-механических характеристик от одного изделия к другому; возможность применения больших значений технологического натяжения; возможность использования препрегов, предварительно пропитанных высоковязкими связующими, в том числе и термопластичными; лучшие технологические условия для намотки изделий, имеющих конусность или

сложные кривизны, за счет эффекта прилипания препрега к оправке; благоприятные экологические последствия.

В зависимости от типа укладки армирующего волокнистого материала в намотанном изделии различают следующие технологические схемы намотки: прямая (окружная); спирально-винтовая (тангенциальная, кольцевая); спирально-перекрестная (спирально-продольная, спирально-поперечная); совмещенная спирально-кольцевая; продольно-поперечная, косослойная продольно-поперечная; планарная (полюсная, орбитальная, плоскостная); тетранамотка; зональная.

Рассмотрим особенности перечисленных схем намотки.

Спирально-винтовая намотка (кольцевая, тангенциальная).[5]

Сущность метода заключается в укладке сформированной ленты волокнистого материала (тканой или однонаправленной) на поверхность оправки по винтовой линии. При этом витки, образованные непрерывной укладкой ленты, плотно прилегают между собой или имеют строго постоянный нахлест, величина которого связана с числом формируемых одновременно слоев заданной структуры.

Возможны два варианта укладки слоев армирующего наполнителя:

- однослойная укладка, при которой образуется слой толщины, равной толщине одной ленты, а ленты между собой укладываются строго встык (рис. 2.1.4 а);
- многослойная укладка, при которой многослойная структура формируется за один проход раскладывающего устройства, а лента укладывается на оправке с нахлестом, характеризуемым параметром (рис. 2.1.4 б).

Этот метод широко используется в сочетании с другими схемами намотки, особенно со спирально-перекрестной намоткой. Отдельно он применяется в тех случаях, когда необходимы повышенные кольцевая прочность или жесткость (например, упрочнение металлических труб, стволов стрелкового оружия, пусковых контейнеров и др.). Данный метод намотки применяют в основном для

изделий цилиндрической формы. Однако возможна намотка изделий с углом конусности  $\varphi < 20^\circ$  ( $\rho > 70^\circ$ ) для "мокрого" и  $\varphi < 30^\circ$  ( $\rho > 60^\circ$ ) для "сухого" способов.

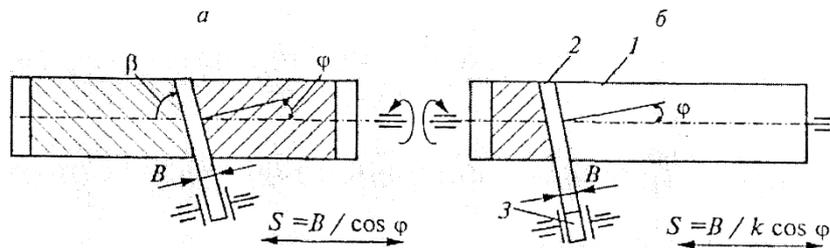


Рис. 2.1.4 Схема спирально-винтовой намотки лентой:

а - в один слой за один проход; б - в k слоев за один проход.

1 - оправка; 2 - наматываемая лента; 3 - катушка с лентой; S - шаг намотки

#### Спирально-перекрестная намотка. [5]

При этом методе лента армирующего материала заданной ширины  $B$  укладывается на оправку с подачей  $S$ , превышающей ширину ленты в целое число раз. За прямой и обратный ход раскладывающего устройства (полный проход) формируется один спирально-перекрестный виток, закрывающий часть поверхности оправки.

При следующем проходе раскладывающего устройства лента укладывается встык к ранее намотанной (рис. 2.1.5). Процесс ведется до тех пор, пока не будет закрыта вся поверхность оправки и, таким образом, сформирован полный двойной слой. Для получения заданной толщины стенки формуемого изделия проводят намотку нескольких таких слоев.

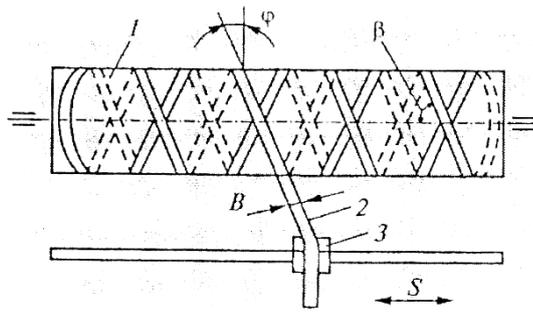


Рис. 2.1.5 Схема спирально-перекрестной намотки:

1 - оправка; 2 - лента; 3 - каретка поперечного перемещения катушки

Описываемый метод намотки наиболее распространен, так как его широко используют для изготовления изделий, имеющих форму тел вращения с произвольной образующей: цилиндров, конусов, сфер, баллонов давления и др. Метод имеет большой диапазон возможностей по конструированию различных схем укладки волокнистого армирующего материала в соответствии с действующими нагрузками.

Меняя угол намотки, можно получить различное распределение нагрузок в продольном и окружном направлениях, т.е. распределяя армирующий наполнитель вдоль направления действия главных напряжений нагруженной конструкции, можно достигнуть максимального использования прочности исходных волокон в изделиях.

С этой целью на практике применяют разновидности спирально-перекрестной намотки: спирально-продольную и спирально-поперечную. В первом случае спиральные витки чередуются с укладкой продольных, а во втором - с укладкой окружных (кольцевых) слоев. Такой технологический прием позволяет реализовать множество схем армирования в изделии.

Совмещенная спирально-кольцевая намотка. [5]

Метод заключается в одновременной укладке армирующего материала, сформированного в ленте, на оправку с двух раскладывающих устройств, движение которых задается программой вращения оправки (рис. 2.1.6). Непременным условием данного способа является то, что начало намотки

спирально-винтовым и спирально-перекрестным методами и их окончание должны быть осуществлены в одно и то же время.

Метод применяют для изготовления намоткой изделий цилиндрической и конической форм с углом конусности не более  $20^\circ$ .

Разработка такого усовершенствованного метода намотки позволила полностью автоматизировать процесс намотки оболочек, исключить вынужденную обрезку ленты армирующего материала при переходе от намотки спиральных слоев к кольцевым, что упрощает силовое замыкание структуры, увеличить производительность намотки на 35-40 %.

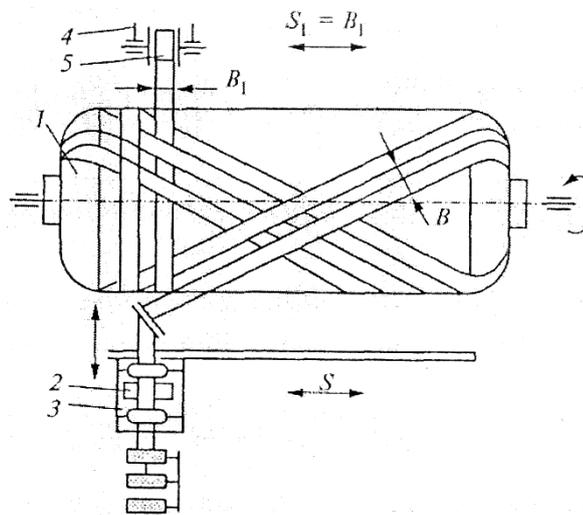


Рис. 2.1.6 Схема совмещенной спирально-кольцевой намотки:

- 1- оправка; 2- лентопротягивающий тракт спиральных слоев;
- 3- суппорт для спиральной намотки; 4- суппорт тангенциальной намотки;
- 5- катушка для кольцевых слоев

При проектировании технологического процесса совмещенной спирально-кольцевой намотки возникает необходимость оптимизировать схему армирования, чтобы максимально использовать положительные стороны способа и выбрать технологические параметры кольцевой намотки для обеспечения расчетной схемы армирования и соответственно несущей способности оболочки.

К технологическим параметрам современной спирально-кольцевой намотки, определяющим конструкцию композиционного материала, относятся подача суппорта кольцевой намотки, ширина ленты кольцевой намотки,

количество армирующего материала в ленте кольцевой намотки. Для равномерного распределения кольцевой и спиральной арматуры по толщине оболочки следует исходить из условия одновременности завершения намотки спирального и кольцевого армирующего материала в пределах одного спирально-кольцевого пакета. В реальных конструкциях соотношение спиральных и кольцевых слоев, как правило, зависит от действующих на изделие нагрузок, т.е. на один спиральный слой может приходиться два, три, а иногда и большее количество кольцевых слоев. Недостаток рассматриваемой схемы намотки - нарушение регулярности структуры материала, проявляющееся в виде образования многочисленных пересекающихся узлов.

Планарная (полюсная, орбитальная, плоскостная) намотка. [5]

Планарная намотка, называемая также полюсной, орбитальной, плоскостной, осуществляется прядью нитей, лентой, жгутом на неподвижную в плоскости намотки и в пределах одного витка оправку. Армирующий наполнитель укладывается относительно продольной оси изделия под заданным углом, близким к  $0^\circ$ , в зависимости от диаметров полюсных отверстий. Устройство-раскладчик может быть неподвижным относительно наматываемого изделия или вращаться вокруг неподвижной оправки (орбитальная намотка). После каждого оборота оправка поворачивается на шаг, соответствующее одной ширине ленты, которая укладывается впритык одна за другой, перекрывая всю поверхность оправки. Готовый слой состоит из двух сложений, направленных в противоположные стороны относительно угла намотки.

### Тетранамотка. [5]

Этот метод получил свое развитие в связи с разработкой сухих отсеков летательных аппаратов, имеющих цилиндрическую форму и подвергающихся действию интенсивных сжимающих нагрузок, при которых существенную роль играют изгибная жесткость элементов структуры оболочки и их прочность при сжатии.

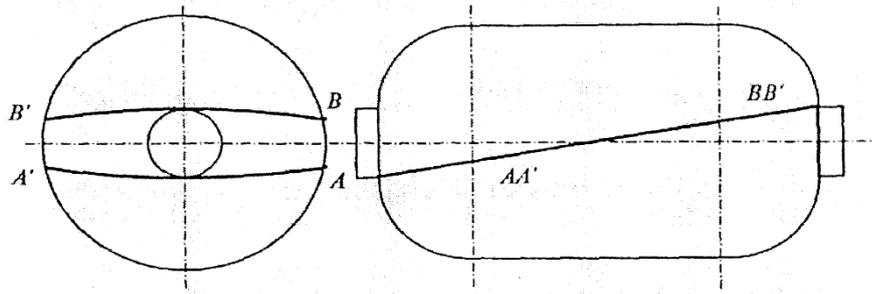


Рис. 2.1.7 Схема тетранамотки

### Зональная намотка. [5]

Этот метод намотки имеет ограниченное применение: его используют в основном для намотки сферических сосудов давления. В силу своей технологической схемы его можно отнести к полюсной намотке. Единственным отличием является наличие смещения раскладчика после окончания намотки очередного слоя в сторону от полюсного отверстия, на расчетное расстояние, с образованием новой зоны, то есть нового слоя, причем слои могут отличаться по толщине.

Появление зональной намотки в практике изготовления сосудов давления, работающих под внутренним давлением, объясняется исследованием наиболее рациональных схем армирования сосудов минимальной массы. Общий вид сферического сосуда давления, изготовленного зональной намоткой, показан на рис. 2.1.8.

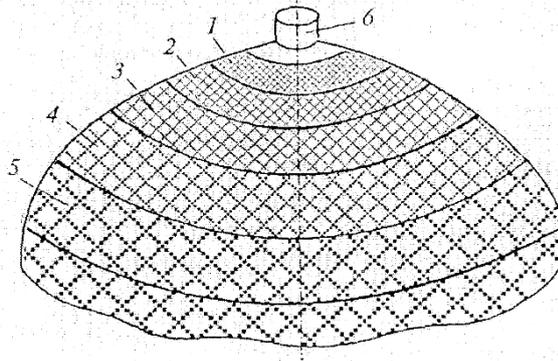


Рис. 2.1.8 Общий вид сферического сосуда давления, изготовленного зональной намоткой:

1-5 - последовательно расположенные зоны; 6 - штуцер

## 2.2. Технологические параметры процесса намотки

В связи с тем, что материал наматываемых изделий формируется во время их намотки, его физико-механические свойства в значительной степени зависят от технологического процесса изготовления таких изделий, точности поддержания его важнейших технологических параметров [51,56].

Основными параметрами, определяющими свойства ПКМ, в соответствии с законом аддитивности являются характеристики компонентов и объемное содержание  $V_B$  волокон в композите:

$$\sigma_K = V_B \sigma_B + (1 - V_B) \sigma_M \quad (2.2.1)$$

Здесь  $\sigma_K$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_M$  - прочности композита, волокон и матрицы.

Из уравнения видно, что с увеличением коэффициента армирования  $V_B$  предел прочности однонаправленного композита линейно возрастает. Однако эксперименты показывают, что существует оптимальное значение коэффициента  $V_B^{OPT}$  (рис. 2.2.1), при котором  $\sigma_K$  достигает своего максимума ( $\sigma_K^{mx}$ ) при растяжении. Так, для однонаправленных стеклопластиков  $V_B^{OPT} = 0.70 \div 0.72$ , а для органо- и углепластиков  $V_B^{OPT} = 0.60 \div 0.65$  [5]

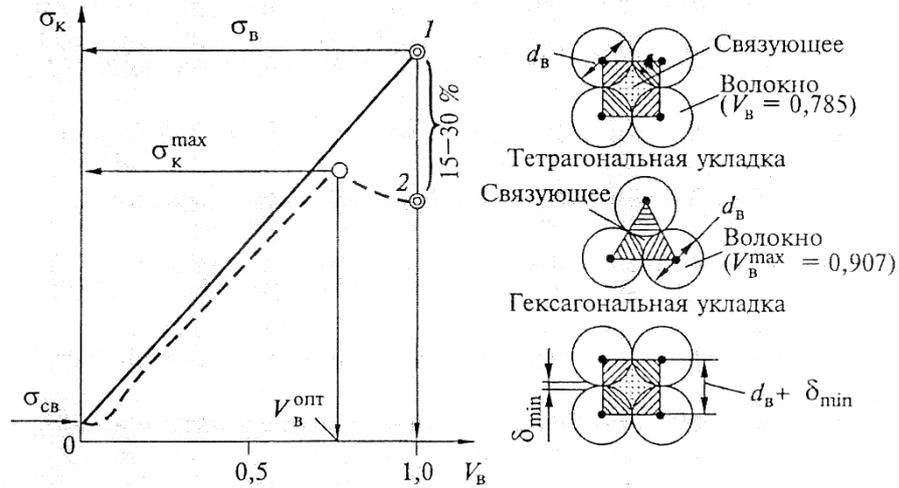


Рис. 2.2.1 Качественная зависимость прочности ПКМ от коэффициента армирования:

1 - теоретический; 2 - практический пределы прочности ПКМ

Это объясняется тем, что предельные значения коэффициента армирования зависят от геометрии упаковки волокон. Так, для круглых волокон в зависимости от схемы их упаковки (рис. 2.2.1) предельные значения  $V_B^{OPT} = 0.907$  (гексагональная укладка),  $V_B^{OPT} = 0.785$  (тетрагональная укладка). Другое ограничение связано с выбором минимального значения толщины прослойки связующего между волокнами, которое приблизительно оценивают следующим образом: [5]

$$\delta_{min} > \frac{d_B}{\varepsilon_{CB} / \varepsilon_B - 1}, \quad (2.2.2)$$

где  $\varepsilon_{CB}$ ,  $\varepsilon_B$  - относительные деформации связующего и волокна соответственно.

Объемное содержание волокон в ПКМ всегда меньше массового вследствие наличия пор и воздушных включений в материале. Соотношение между объемным и массовым содержанием волокон определяется выражением: [5]

$$V_B^{OB} = \frac{V^{MAC}_B}{V^{MAC}_B + \left( + V^{MAC}_B \right) \frac{P_{CB}}{P_B}}, \quad (2.2.3)$$

где  $P_{CB}$ ,  $P_B$  - плотность связующего и волокна соответственно.

Очевидно, что соотношение между объемным и массовым содержанием в системе наполнитель - связующее в основном определяется технологией

изготовления. И, в первую очередь, оно зависит от натяжения армирующего наполнителя и его вида, вязкости и температуры связующего и температуры разогрева препрега, скорости намотки.

При способе "мокрой" намотки все эти параметры необходимо контролировать в ходе технологического процесса изготовления изделия. При способе "сухой" намотки процессы получения намоточного материала и изготовления силовой оболочки разделены и параметрами, подлежащими обязательному контролю, являются технологическое натяжение ленты, скорость намотки и температура разогрева препрега. Остальные параметры отслеживаются в процессе получения ленты препрега. Преимущества метода "сухой" намотки заключаются в возможности обеспечения качественного контроля и поддержания оптимальных значений, перечисленных выше технологических параметров при изготовлении намоточного материала.

Натяжение армирующего наполнителя при намотке.

Выбору технологического натяжения пропитанной ленты при намотке уделяют большое значение [5].

– Натяжение должно создавать нормальное давление на оправку с целью уплотнения материала в процессе формования изделия. Нормальное давление можно рассчитать, используя формулу:

$$P_H = \frac{q_n}{t_n R} \sin^2 \beta, \quad (2.2.4)$$

где  $q_n$  - натяжение ленты;  $t_n$  - ширина ленты;  $R$  - радиус оправки;  $\beta$  - угол намотки.

Зная давление, можно определить, с одной стороны, достаточное ли оно для уплотнения материала, с другой - не вызовет ли оно прогиб оправки или ее разрушение.

– Натяжение должно обеспечивать получение высоких механических характеристик материала за счет одновременного включения: всех нитей (волокон) в работу. Наиболее значительно натяжение нитей влияет на предел

прочности однонаправленных ПКМ. Многочисленные эксперименты показывают, что для однонаправленных стеклопластиков оптимальным является натяжение нити  $q_l = (0.05 \div 0.15)q_{раз}$ , для органопластиков  $q_l = (0.25 \div 0.36)q_{раз}$ , а для однонаправленных углепластиков  $q_l = (0.02 \div 0.07)q_{раз}$ , где  $q_{раз}$  - разрывная нагрузка на ленту.

- Натяжение должно обеспечивать равномерное содержание связующего в материале по толщине, особенно при намотке толстостенных изделий. В этом случае натяжение наполнителя программируют так, чтобы оно сначала увеличилось, а затем уменьшилось при достижении заданной толщины стенки изделия.

- Натяжение должно снижать начальный уровень несовершенства арматуры (искривления). Необходимое натяжение создается в намоточно-пропиточном (нитепроводном) тракте от шпулярника до наматываемого изделия. Нитепроводные тракты - важнейший элемент намоточного станка.

Основные принципы построения нитетрактов следующие:

- нитетракт должен быть (по возможности) коротким;
- конструкции элементов нитетракта должна обеспечивать минимальное травмирование волокон (особенно углеродных) и не способствовать их пушению.

Для выполнения этих требований необходимо, чтобы количество перегибов армирующего материала и касаний им элементов нитетракта было минимальным; жгуты перед пропиткой отделялись одна от другой (рис. 2.2.2 а-г); радиусы перегибов составляли не менее 1045 мм; в местах касаний ленты деталей нитетракта не было защемлений.

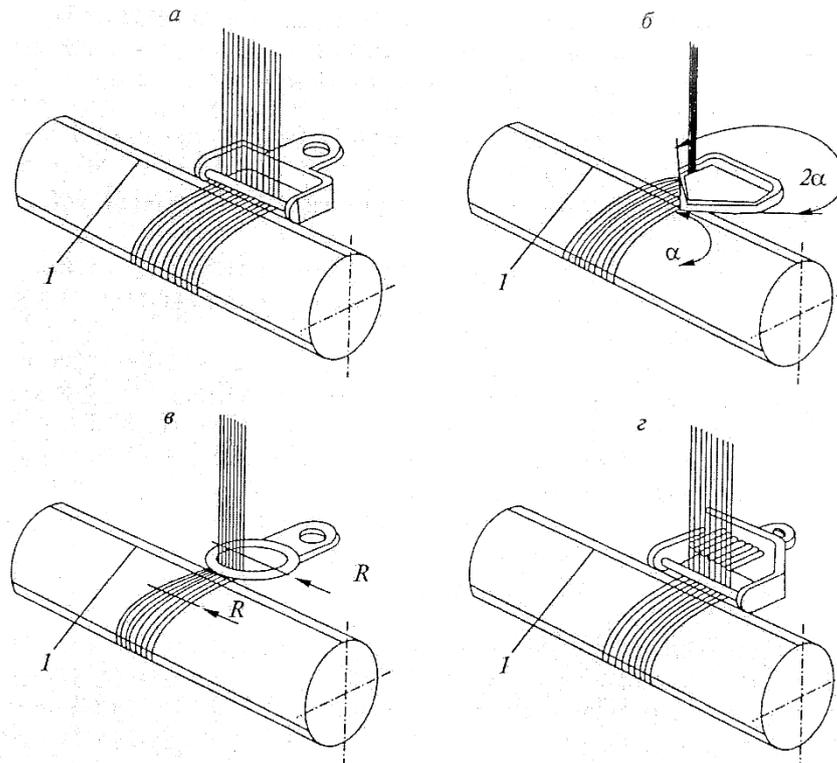


Рис. 2.2.2 Схема формирования ленты перед протяжкой прямым стержнем (а), изогнутым стержнем с прямыми плечиками (б), кольцом (в), гребенкой (г)

1 - линия, параллельная оси оправки

Кроме того, нитетракт должен быть удобен при заправке арматурой и при обрыве нитей в процессе намотки; коэффициент усиления натяжения тракта должен быть близок к постоянному; все элементы нитепроводного тракта, контактирующие с арматурой, должны иметь полированную или хромированную поверхность и высокую стойкость к истиранию (эффективно применение керамики и фторопласта).

В схеме нитепроводного тракта нельзя четко выделить зону создания натяжения, так как все элементы и узлы тракта в той или иной степени влияют на уровень натяжения. Однако в тракте есть элементы, регулирующие уровень натяжения, которые называют натяжителями. Некоторые схемы устройства натяжителей нитей, пряжей нитей, лент показаны на рис. 2.2.3 [5].

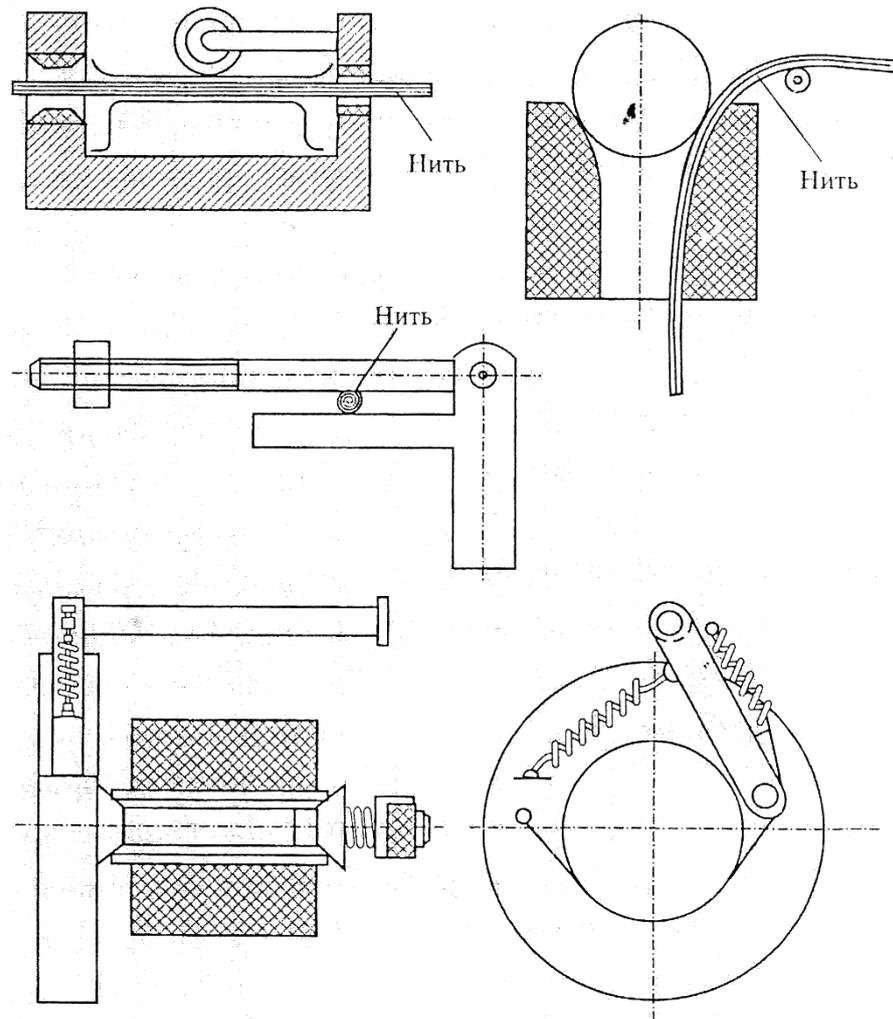


Рис. 2.2.3 Схемы устройств натяжения пряди нитей или ленты

Все устройства имеют механические регуляторы натяжения - тормозные механизмы или нажимные грузики.

Механические натяжители обеспечивают равнатяннутость арматуры в пределах  $\pm 2\text{H}$ .

Параметры процесса пропитки наполнителя.

Известно, что для каждого вида армирующего волокнистого наполнителя существует оптимальное с точки зрения прочности формируемого композиционного материала процентное содержание его в единице объема. Для большей части применяемых при намотке наполнителей оптимальное содержание составляет примерно 50-70 %.

Изменение этого технологического параметра неизбежно приводит к снижению прочности материала. В свою очередь, объемное содержание армирующих нитей в изделии зависит от многих параметров процесса получения намоточной ленты: вязкости полимерного связующего, скорости протягивания нитей через пропиточную ванну, количества и плотности упаковки, одновременно пропитываемых волокон, а также их способности к смачиванию данным типом связующего [5].

Вязкость связующего на практике определяют с помощью простых вискозиметров типа ВЗ-4 и измеряют ее в секундах. Согласно измерениям по ВЗ-4, вязкость - это время, за которое вытекает 100 мл связующего из конической воронки, имеющей диаметр выходного сечения 4 мм. Чем меньше вязкость связующего во время соприкосновения с армирующими волокнами, тем лучше пропитка намоточного материала, тоньше его слой на каждом волокне и, следовательно, выше объемное содержание наполнителя в ПКМ и конечная прочность этого материала. С целью уменьшения вязкости связующего в него добавляют растворитель типа ацетонспиртовой смеси, родственный высокомолекулярный полимер или дополнительно подогревают его.

Следует заметить, что подогрев связующего во время пропитки нужно осуществлять кратковременно и до определенных температур, так как это может привести к загустеванию и реакции полимеризации. С целью уменьшения наноса связующего на протягиваемую через него ленту на выходе из пропиточной ванны устанавливают отжимные валки или острые скребки, снимающие излишки связующего с верхней и нижней сторон намоточной ленты.

При способе "мокрой" намотки содержание наполнителя в композиционном материале может изменяться по толщине изделия: уменьшиться по мере удаления слоя от поверхности технологической оправки. Это происходит вследствие того, что сжимающие силы в материале, возникающие от технологического натяжения наматываемой ленты, суммируются пропорционально нарастанию толщины стенки изготавливаемого изделия и жидкое связующее выдавливается, мигрируя от нижних слоев к верхним. Получившееся в результате этого процесса

соотношение между содержанием наполнителя и связующего фиксируется при отверждении, что приводит к неодновременности включения слоев в работу при нагружении эксплуатационными силами.

При "сухом" способе намотки фиксация этого важнейшего технологического параметра происходит уже при подсушке намоточной ленты в нагревательной камере, обеспечивающей удаление растворителя и частичную полимеризацию термореактивного связующего. При такой технологии изготовления изделий выдавливания связующего из нижних слоев в верхние почти не происходит.

В процессе непрерывной намотки изделий и производстве препрегов используют в основном пропитку окунанием арматуры в ванночку (рис. 2.2.4 а) и пропитку на вращающемся барабане; так называемый "типографский" или "лаковый" способ (рис. 2.2.4 б).

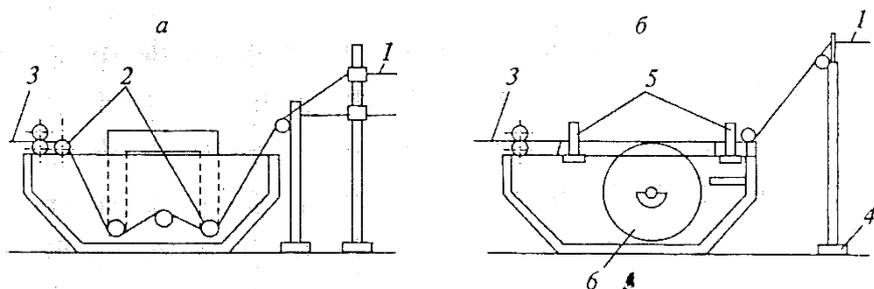


Рис. 2.2.4 Два способа пропитки наполнителя:

а - пропитка окунанием; б - на вращающемся барабане.

1 - нити, сматываемые со шпуляника; 2 - направляющие ролики; 3 – отжимные валики; 4 - устройство формирования ленты из пряди; 5 - валики, регулирующие угол охвата лентой барабана; 6 – барабан с внутренним нагревом

Вторая схема более предпочтительна, поскольку упрощает обслуживание и позволяет перейти на нагрев связующего не во всем объеме ванночки, а только в зоне пропитки, что существенно снижает температуру связующего в ванночке и резко увеличивает его жизнеспособность. В соответствии с первым способом связующее нагревается во всем объеме ванночки, поэтому жизнеспособность связующего, например ЭДТ-10, не превышает 2 ч. Большой недостаток этого способа - необходимость введения системы

термостатирования пропиточной ванны, регулирования и закачки теплоносителя (глицерина, масла, воды) в рубашку дна и стенки ванны с обеспечением герметичности [5].

При пропитке окунанием перемешивание связующего в ванночке происходит за счет движения ленты, при барабанной пропитке вследствие вращения барабана, что повышает интенсивность перемешивания, выравнивает температуру связующего и улучшает качество пропитки. Тем не менее, оба метода не позволяют существенно повысить жизнеспособность связующего. Этому недостатка лишен радиационный метод нагрева ленты и связующего в зоне пропитки при барабанном способе. Простым подбором расстояния от инфракрасного нагревателя до зоны пропитки обеспечивается нужная температура в этой зоне. За счет того, что нагреву подвергается локальный участок, значительно снижается потребляемая мощность. [5] Однако и этот способ имеет два недостатка: трудность организации контроля и регулирования температуры связующего в зоне нагрева и пропитки; зависимость качества прогрева от скорости движения ленты (пропитки).

Однако резкое уменьшение температуры связующего во всем объеме ванночки, увеличение живучести и, как следствие, времени межоперационных промывок нитетракта, а также снижение требований по температуре к доливаемому связующему в процессе его расходования делают этот способ наиболее перспективным.

Переработка связующего при повышенных температурах, приводящая к образованию сгустков и преждевременному частичному отверждению связующего, выражающемуся в быстром нарастании вязкости, предъявляет определенные требования к ванночкам. Это прежде всего отсутствие застойных зон, где массообмен затруднен и "старое" связующее может стать центром нарастания вязкости во всем объеме [5].

Для непрерывного процесса намотки необходимо, чтобы ванночки были быстросъемными, причем в комплекте нитетракта их должно быть не менее двух. Ванночка и узлы, остающиеся на тракте, должны быть скомпонованы таким

образом, чтобы все участки были доступны к промывке растворителями. Особенно это относится ко всякого рода втулкам, подшипникам, пробкам и узлам трения, в которые не исключено попадание связующего. Выполнение конструктором этих условий существенно облегчит эксплуатацию оборудования и повысит надежность процесса намотки.

### 2.3. Параметры процесса отверждения полимерного композиционного материала [55,71,72,76]

Процесс превращения полимерного связующего из жидкого состояния, в котором оно лучше пропитывает волокнистую арматуру, в твердое называют полимеризацией, или отверждением. Для некоторых смол (например, полиэфирных) отверждение наступает в результате реакции поликонденсации. Наиболее эффективно отверждение связующего осуществляется при нагреве материала. Полимерные связующие, у которых отверждение является необратимым процессом, называются термореактивными. Полимеры, которые при нагревании могут повторно переходить в жидкое или пластичное состояние, являются термопластичными смолами. Режимы процесса отверждения определяются видом применяемого полимерного связующего и входящего в его состав отвердителя, а также толщиной стенки намотанной оболочки, частично ее размерами и формой. [5]

Наиболее технологичными для процесса намотки являются отвердители, обеспечивающие ускорение отверждения полимера при нагревании изделия до определенных температур, способствующих сшивке молекул и образованию сетчатых структур. Для распространенных эпоксидных связующих такими отвердителями являются соединения на основе алифатических и ароматических аминов. Например, ТЭАТ (триэтаноламинтитанат) обеспечивает довольно длительную жизнеспособность эпоксидного компаунда типа КДА (ТУ6-05-1380-76) при комнатной температуре и достаточно быстрое его отверждение при нагреве до 455 К.

Схематично процесс отверждения эпоксидного связующего в нагревательной печи выглядит таким образом (рис. 2.3.1):

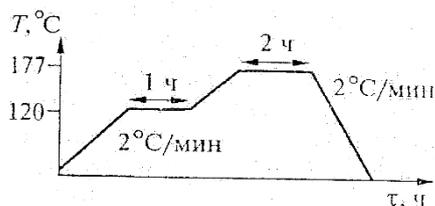


Рис. 2.3.1 Процесс отверждения эпоксидного связующего

Типовой процесс термообработки ПКМ на основе эпоксидного связующего:

- нагрев до температуры гелеобразования связующего  $T_g$  (порядка 350-393К), соответствующей температуре формирования полимерной сетки, при которой связующее утрачивает текучее состояние, теряет жизнеспособность и технологичность;
- выдержка для обеспечения прогрева всей массы изделия;
- нагрев до температуры стеклования  $T_{CA}$ , при котором связующее твердеет;
- повышение температуры до оптимальной температуры отверждения (около 453 К);
- выдержка до окончания полимеризации связующего;
- охлаждение до комнатной температуры.

В процессе отверждения в материале (в волокнах и связующем) возникают усадочные напряжения за счет уменьшения объема (2-30 %) жидкого связующего при его затвердении. При этом связующее испытывает растягивающие, а волокна - сжимающие напряжения. Кроме того, вследствие различия коэффициентов линейного расширения волокон и связующего в них возникают термические напряжения, как правило, того же знака. Эти напряжения снижают (компенсируют) технологическое натяжение нитей при намотке [5].

В связи с тем, что композиционные материалы (КМ) на основе полимерных связующих, как правило, имеют довольно низкую теплопроводность, при больших толщинах намотанного и помещенного в печь изделия возможны

случаи, когда на его наружной поверхности, соприкасающейся с нагретым воздухом, уже началась реакция полимеризации связующего, в то время как глубинные слои у технологической оправки еще не прогрелись до этой температуры. В результате толстостенные трубы нередко имеют дефекты в виде расслоений и межслоевого растрескивания. Для борьбы с этими явлениями либо увеличивают время выдержки, обеспечивающей прогрев изделия при более низкой температуре, либо применяют процесс изготовления, заключающийся в чередовании послойной намотки с операцией отверждения [5].

Для некоторых синтетических смол, используемых при намотке, например, фенольных, кроме термообработки в процессе отверждения необходимо обеспечить давление по наружной поверхности изделия. В этом случае отверждение изделий осуществляют в автоклавах при давлениях на формуемую поверхность порядка 0,35-0,7 МПа, передаваемых от жидкого или газового рабочего тела через эластичный мешок или диафрагму. Обжатие КМ при его отверждении, обеспечивающее монолитизацию материала и получение изделий с улучшенными физико-механическими свойствами, нередко проводят и при использовании других видов связующих. Для этих целей кроме автоклавного применяют следующие формования: [2,3,4,19,21,23,25]

- вакуумное с эластичной диафрагмой;
- под действием теплового расширения;
- с обжатием термоусаживающейся лентой.

Первый из этих способов используют в тех случаях, когда нельзя применять автоклавы из-за больших геометрических размеров изделия, например, для труб длиной около 10м и выше. Основные стадии такого процесса заключаются в послойной укладке материала, подготовке системы отверстий для выпуска газов, излишков связующего и формовании надеваемой сверху диафрагмы. Эластичную диафрагму, соответствующую конфигурации формуемой детали, размещают над уложенными слоями материала, подключают к выпускной системе, вакуумной линии и уплотняют по линии стыка. Обычно сначала создают небольшой вакуум, чтобы разгладить поверхность диафрагмы, а затем

окончательно вакуумируют и нагревают систему. В большинстве случаев вакуум поддерживается на протяжении всего цикла нагрева и охлаждения.

Один из методов формования под действием теплового расширения заключается в намотке нескольких слоев резины, например, силиконовой, на намотанные или уложенные слои композиционного материала и в размещении всего этого пакета в металлическую жесткую форму, которую, в свою очередь, помещают в нагревательную печь. При повышении температуры резиновая масса расширяется в большей степени, чем ограничивающая ее металлическая оснастка, что вызывает давление на отверждаемый материал. Благодаря этому отпадает необходимость в приложении внешнего давления, как это делается при автоклавном формовании. При использовании силиконовой резины не требуется применять дополнительную антиадгезионную подложку, так как эта резина обладает низкой адгезией к большинству применяемых связующих. Если масса резины при таком обжатии выбрана без учета объема внутренней полости охватывающей оснастки, может развиться очень высокое давление - до 5,6 МПа.

Тканые ленты из кремнеземных нитей обладают способностью усаживаться (уменьшать свою длину на 5-7 %) при нагревании до 500-600 К. Подобные ленты применяют для уплотнения материала, намотанного на жесткую технологическую оправку, при его отверждении в нагревательной печи. Если у витков термоусаживающейся ленты отсутствует возможность взаимного проскальзывания, то, укорачиваясь, они обеспечивают прижатие расположенного под ними слоистого материала к оправке, монолитизируют его, в результате чего повышаются физико-механические характеристики изделия.

Широко распространенная термообработка изделий в печах с целью отверждения связующего в КМ наряду с простотой обладает и рядом технических недостатков.

Во-первых, очень много времени и энергии расходуется на разогрев и выдержку изделия при расчетных температурах. Во-вторых, возникают

технические трудности с отверждением изделий, имеющих большие габариты, из-за отсутствия соответствующих печей. Кроме того, при отверждении толстостенных изделий трудно разогреть только наружную поверхность.

Все эти недостатки значительно снижают эффективность и коэффициент полезного действия применяемых в настоящее время печей и вынуждают исследователей искать другие источники нагрева и методы отверждения полимерных смол.

Один из наиболее перспективных методов - разогрев связующего под воздействием сверхвысокочастотного электромагнитного поля, при котором дипольные молекулы полимера, колеблющиеся синхронно изменению частоты, за счет внутреннего трения очень быстро разогреваются до высоких температур одновременно во всем объеме изделия. Интересными также являются исследования по радиационно-химическому отверждению связующих под действием ускоренных электронов. Имеется информация о том, что применение последнего метода обеспечивает не только ускорение процесса, но и повышение физико-механических параметров материала.

Иногда для ускорения процесса отверждения, например при массовом выпуске изделий, в связующее добавляют катализаторы, активные химические добавки, способствующие существенному убыстрению процесса полимеризации. Известны случаи, когда под воздействием таких добавок и интенсивного дополнительного нагрева изделий при помощи кварцевых ламп отверждение связующего осуществлялось за 15-20 мин [5].

#### **2.4. Исходные материалы для изготовления сверхлегких баллонов высокого давления**

**Высказанные ранее требования к конструкционным параметрам баллонов высокого давления, из которых основным является весовое совершенство, позволяют сформулировать следующие требования к исходным материалам:**

- Армирующие материалы должны обладать максимальными прочностными свойствами на разрыв. Это жгуты и ровинги [5].
- Армирующие материалы должны иметь аппретирующую обработку под используемое связующее для обеспечения хорошей смачиваемости и пропитанности [5].
- В качестве полимерной матрицы используются терморезистивные полимеры, имеющие сетчатую химическую структуру, макромолекулы которой соединены поперечными ковалентными связями имеют наибольшую прочность по сравнению с другими полимерами, Наибольшую популярность получили эпоксидные смолы (табл.2.4.1-2.4.2) как наиболее прочные (до температуры эксплуатации 150°C) и технологичные при намотке баллонов [5].

Таблица 2.4.1

Свойства отвержденных полимерных матриц [5]

Свойства	Полиэфирные (из олигоэфирэфиратов)	Фенолоальдегидные	Эпоксидные	Кремний-органические	Полиимидные
$\rho, \text{г/см}^3$	1,1-1,46	1,2-1,36	1,1-1,4	1,15-1,36	1,2-1,45
$E_{\text{ВН}}, \text{ГПа}$	2,0-3,2	1,4-4,3	3,0-3,3	4,2-4,5	3,2-5,0
$E^+, \text{ГПа}$	1,5-4,5	1,4-6,8	1,9-5,0	1,5-3,7	3,2-5,5
$\sigma^+, \text{МПа}$	23,5-68,5	22,5-78,3	27,4-140	6,8-34,2	90-95
$\sigma^-, \text{МПа}$	50,0-250	68,5-205	85-274	49-103	250-280
$\sigma_{\text{ВН}}, \text{МПа}$	10,8-127	45-118	58,8-157	6,8-96	80-140
$\varepsilon^+, \%$	0,5-6,0	0,4-3,0	1,2-10,0	0,3-1,5	1,0-4,0
$\alpha_k, \text{кДж/м}^2$	2,0-10,7	2,0-11,3	2,9-24,5	2,3-5,4	4,0-12,0
$\alpha \cdot 10^6, \text{К}^{-1}$	60-90	60-80	48-80	20-40	50-58
Усадка при отверждении, %	4-15	0,5-7,0	0,5-3,6	2,1-4,3	0,5-2,0
Водопоглощение за 24ч, %	0,15-0,6	0,15-0,6	0,03-0,3	0,05-0,2	0,01-0,6
$\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{К}$	0,12-0,23	0,23-0,27	0,17-0,21	0,4-0,6	0,35-0,37
Диэлектрическая проницаемость при $10^6 \text{ Гц}$	4,1-4,5	3-5	3,2-4,5	2,6-4,2	3,4-3,8
$\rho_V, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$10^{12} - 6 \cdot 10^{13}$	$10^9 - 10^{10}$	$10^{13} - 8 \cdot 10^{14}$	$10^{12} - 10^{13}$	$10^{14} - 10^{15}$
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,022-0,024	0,015-0,035	0,01-0,03	0,001-0,025	0,001-0,005

Электрическая прочность, МВ/м	12-19	12-16	15-25	20-30	20-30
-------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Продолжение табл.2.4.1

Свойства	Полиэфирные (из олигоmaleинов)	Фенолоальдегидные	Эпоксидные	Кремний-органические	Полиимидные
Деформационная теплостойкость по Мартенсу, $T_m$ , °С	45-60	140-180	140-150	250-280	250-370

Таблица 2.4.2

Значения упругопрочностных и деформационных свойств эпоксидных матриц.

Матрицы эпоксидные с температурой отверждения, °С	$\sigma^+$ , МПа	$E^+$ , ГПа	$\varepsilon^+$ , %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\alpha \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup>
20-50	75	3,2	4,8	1,16	60
120	90	2,7	8,5	1,21	68
180	60	2,3	3,3	1,15	65

В таблице 2.4.3 представлены основные характеристики стеклоровингов, которые используются для изготовления изделий методами намотки. Для изготовления баллона БК-7 целесообразно использовать ровинги с линейной плотностью 800...1200 текс, что связано с получением более плотной упаковки волокнистой структуры и с производительностью. [5]

Таблица 2.4.3

Основные характеристики стеклоровингов из стеклянных нитей

Марка	Назначение	Результирующая линейная плотность, текс	Разрывная нагрузка, Н, не менее	Массовая доля замасливателя, %	Массовая доля влаги не более, %
РБН 10-420-78	Для изготовления изделий из СП методами намотки и протяжки	420±35	200	0,7-1,2	0,5
РБН 10-840-78		840±70	400		
РБН 10-1260-78		1260±88	450		
РБН 10-2520-78		2520±176	800		
РВМН 10-420-78		420	240		
РВМН 10-1260-78		1260	800		

РВМН 10-1680-78		1680	1000		
РВМН 10-2520-78		2520	1500		

В таблице 2.4.4 представлены сравнительные свойства органических волокон в сравнении с углеродным высокопрочным и стеклянным высокомодульным. Исходя из приведенных данных, характеристики, удовлетворяющие намоточным конструкциям, имеют волокна из арамидных сополимеров (Армос) и ПФБТ (Полифениленбензтиазол). Однако сложное и дорогостоящее производство и высокая стоимость органожгутов не позволяют их использовать для намотки баллонов [5].

В настоящее время изготавливаются высокопрочные углеродные волокна с высоким модулем упругости, которые позволяют их использовать в углепластиках для силовой оболочки в комбинированных баллонах давления. Для баллона БК-8 был выбран углеродный жгут Т-700 с линейной плотностью 800 текс [5].

Таблица 2.4.4

Углеродные материалы, выпускаемые ведущими зарубежными фирмами [5]

Фирма	Марка	$\sigma, \text{МПа}$	$E, \text{ГПа}$	$\gamma, \text{г/см}^3$	Сырье
Геркулес Инкорпорейшн графит Фиберз Бизнес Сентер	<u>Геркулес</u>				
	AS6	4137	243	1.83	ПАН
	IM6	4378	278	1.83	ПАН
	HM	2755	379	1.84	ПАН
Юнион Карбид Корпорешн	<u>Торнел</u>				
	T-300	3200	228	1,70	ПАН
	T-500	3650	241	1,79	ПАН
	T-700	4550	248	1,81	ПАН
	P-75	2100	520	2,00	ПЕК
Торей Индастриз Инкорпорейшен	<u>Торейка</u>				
	T300	3500	235	1,76	ПАН
	T800	5700	300	1,81	ПАН
	T1000	7200	300	1,82	ПАН
	M40	2800	400	1,81	ПЕК
	M50	2500	500	1,91	ПЕК
ТОХО	<u>Бесфайт</u>				
	ST-3	4400	240	1.77	ПАН
	HM-40	2600	400	1.83	ПАН
	HM-45	2200	450	1.90	ПАН
	3M-500	4800	300	1.77	ПАН

Ниппон Карбен	<u>Карбалол</u>				
	3-2000	3260	245	1,77	ПАН
	3-4500	3060	235	1,77	ПАН
Продолжение табл. 2.4.4					
Мицубиси Рейэн	<u>Пирофил</u>				
	М-1	2600	360	1,85	ПАН
Мицубиси Рейэн Селанез Плэйтиск энд Спешитиз Компани	Т-1	3400	250	1,80	ПАН
	<u>Целион</u>				
Селанез Плэйтиск энд Спешитиз Компани	GY-70	1900	530	1.90	ПАН
	6R	3690	2400	1.77	ПАН

Таблица 2.4.5

Некоторые виды углеродных материалов, разработанных в России[5]

Конструкционные нити	$\sigma, \text{МПа}$	$E, \text{ГПа}$	$\gamma, \text{г/см}^3$
УКН-5000	3300	230	1,72
УКН-5000П	3400	240	1,73
УКН-П-0,1	3700	230	1,74
УКН-2500П	3400	240	1,73
УКН В-400	4300	240	1,75
ВМН-4	2800	240	1,75
Гранит 300	3000	300	1,80
Гранит 40П-0,1	3700	400	1,82
Кулон-Н	3500	560	1,92

**Анализируя представленные характеристики армирующих материалов и полимерных матриц принимаем для изготовления баллона БК-7 используется стекложгут РВМН 10-420-78, а для баллонов БК-8 углеродный жгут фирмы “Торнел”, марки Т-700. В качестве полимерной матрицы выбрано эпоксидное связующее марки ЭДУ.**

## 2.5. Оборудование для намотки

Изготовление нитевых конструкций стало возможным после создания намоточных станков с программным управлением. Как уже отмечалось,

автоматизированная непрерывная укладка (намотка) лент, прядей, жгутов армирующего материала обеспечивает при большой промышленной производительности максимальную реализацию прочностных и физических свойств используемых материалов в создаваемых изделиях промышленного назначения [5].

Типичные конструктивные схемы исполнения намоточных станков, используемых для реализации метода намотки, представлены на рис. 2.5.1-2.5.4.

Станок, как правило, состоит из трех основных функциональных устройств: 1-намоточное устройство, 2 - пропиточное устройство, 3 - устройство хранения и подготовки нитей (шпулярник) (рис.2.5.1). В зависимости от принимаемой схемы подготовки нитей возможны различные схемы исполнения станка в целом.

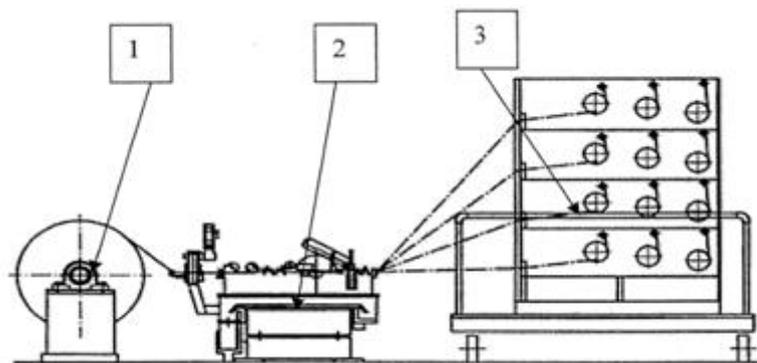


Рис. 2.5.1 Основные функциональные устройства станка



Рис. 2.5.2 Намоточный станок с вынесенным приводом вращения и стойкой закрепления оправки



Рис. 2.5.3 Намоточный станок с вынесенным приводом вращения и единой стойкой закрепления оправки

На рис. 2.5.2 приведен намоточный станок, выполненный по схеме с вынесенным приводом вращения и стойкой закрепления оправки.

На рис. 2.5.3 - станок с вынесенным приводом вращения и единой стойкой закрепления оправки.

На рис. 2.5.4 - трех шпиндельный станок рамного типа.



Рис. 2.5.4 Трех шпиндельный намоточный станок рамного типа

Как уже отмечалось, современные композиционные материалы обычно состоят из двух компонент: волокна и полимерной матрицы (связующего), то есть непрерывной фазы. В качестве армирующих волокон обычно используется стекловолокна, органические волокна, углеродные волокна или другие их типы.

Матрица обычно является термореактивным материалом таким, например, как полиэфирная или эпоксидная смола. При этом получаемые параметры материала в конструкции в основном зависят от относительного и абсолютного соотношения между волокнистым и изотропным компонентами и рисунка укладки волокнистого материала. И определяющим при этом, является технология пропитки волокон связующей матрицей.

Отличительной особенностью используемых при намотке нитей или жгутов волокнистого материала является их структура. Используемые в ленте нити или жгуты состоят из многочисленных элементарных микроволокон, диаметр, которых составляет от 6 до 20 микрон. Количество таких микроволокон в нити достигает порядка 1000 (стеклонити ВМП-300 волокон, жгуты УКН-5000 -5000 волокон).

В силу такой структуры в нити содержится многочисленное количество микропор, которое, как правило, составляет минимум 22% от объема занимаемого нитью. При пропитке таких нитей основной задачей является задача замещения воздуха и влаги, находящихся в данных микропорах, используемым связующим. В силу микроскопических размеров пор между волокнами, при процессе замещения действуют законы капиллярного эффекта, приводящие к тому, что для замещения существующего в капиллярах воздуха и влаги необходимо создание на нить высоких градиентов давлений. При этом, наиболее целесообразно использовать связующие с низкой вязкостью и коэффициентом поверхностного натяжения.

Кроме того, при использовании метода намотки волокнистого материала происходит захват воздуха, в результате чего в структуре композита дополнительно образуются раковины и неоднородности, которые приводят к появлению локальных зон разрушения композита.

Поэтому, для обеспечения работы станка любой конструктивной схемы принципиальным является выбор конструктивной схемы пропитки связующим наматываемых нитей.

В настоящее время известны многочисленные способы решения отмеченных выше задач [5]. Среди данных способов, наиболее распространены способы и устройства, в которых для создания градиента давления используются различного рода барабаны и ролики с различной их модификацией.

Известны примеры создания пропиточных устройств с использованием способов создания гидравлического напора на слив самым связующим. Известны решения, когда пропитка нитей производится одновременным созданием градиента давления и вакуумированием. На рис.2.5.5 представлены типовые схемы пропиточных устройств [5], используемые в приведенных выше конструкциях намоточных станков.

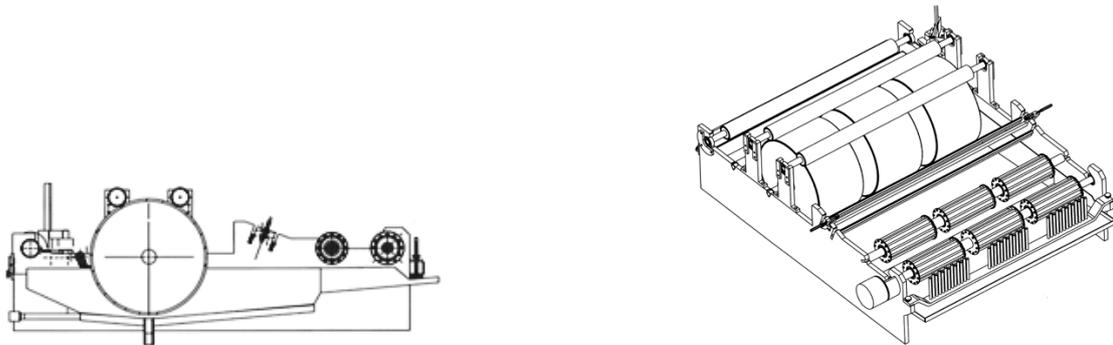


Рис. 2.5.5 Типовые схемы пропиточных станков

На рис. 2.5.6 представлена конструктивная схема пропитки барабанного типа.

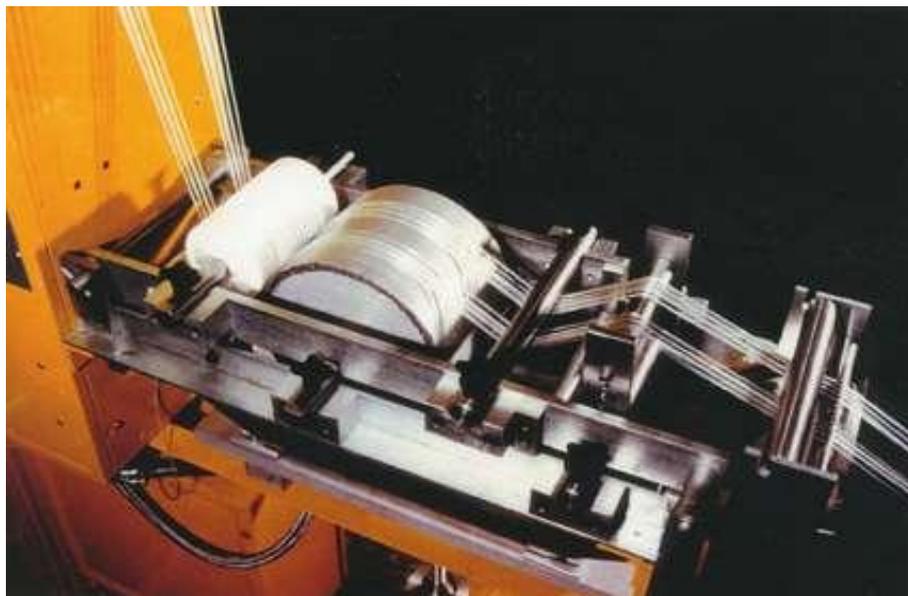


Рис. 2.5.6 Схема пропитки барабанного типа

Следует отметить, что для каждого типа используемого волокнистого материала целесообразно подбирать и тип пропиточного устройства. Так, например, для высокомодульных угольных волокон недопустимы резкие перегибы последних. В силу этого, в пропиточных устройствах для подготовки таких волокон используют принцип наименьшего изгиба волокна при его движении по пропиточному тракту (рис. 2.5.7) [5].



Рис. 2.5.7 Конструктивная схема пропитки с прижимными роликами

Как правило, при намотке исполнительные органы намоточного станка движутся неравномерно, создавая переменные усилия натяжения в укладываемой ленте нитей. Такие неравномерные колебания усилия натяжения нитей приводят к некачественной пропитке и намотке. Для исключения данного отрицательного эффекта используют различного рода стабилизаторы и компенсаторы натяжения нитей, которые совмещаются с устройствами для хранения нитей (шпулярниками).

Для непосредственной укладки армирующих лент по заданным траекториям на опрае в конструкциях станков используют также различные конструктивные схемы и решения для исполнительных раскладывающих головок.

При реализации метода намотки, как правило [5], формируют ленты из различных волокнистых наполнителей: нитей, жгутов, лент и их комбинаций. При этом, как уже отмечалось ранее, используют различные волокнистые материалы: стеклонити или жгуты, угольные нити или жгуты, арамидные нити или жгуты и другие. Данные наполнители как правило хранятся в виде

специальных шпуль с которых могут разматываться как с внешней стороны, так и из внутренней, при этом для их размотки требуются различные устройства, учитывающие инерционность шпуль при создании натяжений на используемые при намотке ленты. Использование данных наполнителей требует создания и специальных устройств - шпулярников в намоточных станках для их размещения и формирования из них лент, используемых для пропитки и укладки по заданным траекториям на поверхности оправки.

Компенсация инерционных нагрузок на наматываемые нити в данных конструкциях реализуются по различным схемам с использованием тормозных двигателей.

Практически во всех представленных выше конструкциях станков при их работе в общем случае для реализации укладки армирующих нитей или волокон по некоторым заданным траекториям на оправках с поверхностями общего вида могут быть использованы следующие движения его исполнительных органов (рис. 2.5.8).

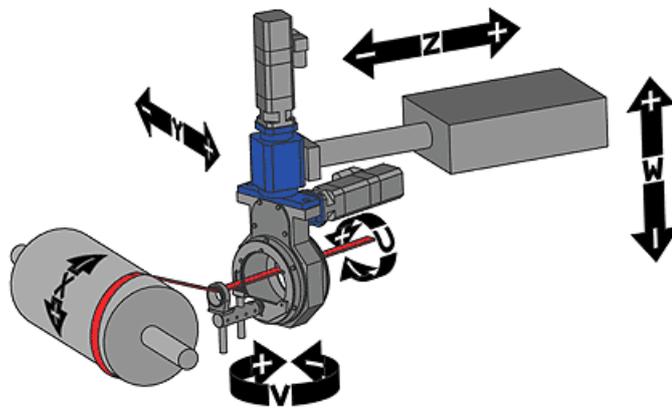


Рис. 2.5.8 Движения исполнительных органов

- а) вращательное движение оправки (характеризуется угловой координатой  $\pm x$ );
- б) поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки вдоль оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm y$ );

в) поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm z$ );

г) поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm w$ );

д) поворот раскладочной головки относительно оси  $z$  (характеризуется угловой координатой  $\pm u$ );

е) поворот раскладочной головки относительно оси  $w$  (характеризуется угловой координатой  $\pm v$ ).

На практике, [5] наиболее распространенными схемами намоточных станков являются четырех координатные ( $\pm x, \pm y, \pm z, \pm u$  ИЛИ  $w$ ) или трех координатные ( $\pm x, \pm y, \pm z$ ). Оболочки, создаваемые технологией намотки с использованием таких станков, являются, как правило, оболочками вращения, что ограничивает класс получаемых конструкций, в которых метод намотки может быть реализован. В общем случае, используя многокоординатные исполнительные органы современных намоточных станков, можно реализовать намотку волокнистого материала практически по любым траекториям на поверхности будущего изделия. Однако существует целый ряд ограничений геометрического и физического характера, которые существенно сужают возможности использования метода намотки при создании конструкций из композиционных материалов [5]. Анализируя современные направления в развитии метода намотки, следует отметить, что деятельность большинства мировых производителей оборудования сконцентрировалась в двух направлениях: [5]

– разработка универсальных станков (в основном для отработки новых изделий) с измененной геометрией рабочей зоны и максимальным оснащением станков дополнительными средствами намотки и выкладочными головками;

– разработка специальных станков (серийное производство) для изготовления изделий определенной геометрии и размеров. В последних, как

правило, используют стандартные узлы привода и управления, применяемые при создании различных намоточных устройств.

Для изготовления баллонов высокого давления в серийном производстве целесообразно использовать четырех координатные намоточные станки с координатами  $\pm x, \pm y, \pm z, \pm u$ .

## ГЛАВА III. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАМОТКИ ОБОЛОЧЕК.

### 3.1. Определяющие технологические параметры метода намотки нитью

В процессе намотки армирующих нитей на поверхности оправки образуется некоторый рисунок, определяющий схему армирования оболочки будущего изделия.

Известно [5,21,79,80], что геодезическая линия, касающаяся торцевых краев поверхности оправки  $\Sigma_0$  состоит из геодезических кусков  $\gamma_l^+, \gamma_l^-$ ,  $l = 0, 1, 2, \dots$ , каждый из которых в краевых сечениях (точках) касается того или иного края поверхности  $\Sigma_0$ .

При этом, следует отметить, что если приращение угла поворота оправки  $\Delta\varphi = \frac{P}{q}\pi$  ( $P, q \in N$ ) за один шаг (от точки касания геодезической линии с краем оправки  $u = \alpha$  до точки касания с краем  $u = \pi - \alpha$ ), то геодезическая линия на рассматриваемой поверхности оправки  $\Sigma_0$  замкнется через  $2q$  шагов. Причем, если  $\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = m$  ( $m$  - целое число), то за один шаг геодезическая линия  $m$  раз обходит поверхность  $\Sigma_0$  и не покрывает всю поверхность  $\Sigma_0$  рассматриваемой оправки. В случае если  $\frac{\Delta\varphi}{\pi}$  - иррациональное число, то геодезическая линия всюду плотно обматывает поверхности  $\Sigma_0$ .

При этом кусок геодезической линии  $\gamma_0^+$  задается уравнением  $\varphi = \phi(u)$ , а кусок геодезической линии  $\gamma_0^-$  уравнением  $\varphi = -\phi(u)$ , и все куски геодезической линии  $\gamma_l^+$  получаются из  $\gamma_0^+$  поворотом  $\gamma_0^+$  на угол  $2\Delta\varphi l$ , а  $\gamma_l^-$  поворотом  $\gamma_0^-$  также на угол  $2\Delta\varphi l$ .

Таким образом, уравнения этих геодезических линий на поверхности  $\Sigma_0$  имеют вид:

$$\gamma_l^+ : \varphi = \phi(u) + 2\Delta\varphi l \quad (3.1.1)$$

$$\gamma_l^- : \varphi = -\phi(u) + 2\Delta\varphi l ,$$

При этом, если  $\Delta\varphi = \frac{P}{q}\pi$ , то  $\gamma_q^\pm = \gamma_0^\pm$ ,  $\gamma_{q+1}^\pm = \gamma_1^\pm$ , то есть эти куски, начиная с номера  $q$  совмещаются с предыдущими.

Если же  $\Delta\varphi$  - иррационально, то куски никогда не совмещаются и вся геодезическая линия всюду плотно обматывает поверхность  $\Sigma_0$ . Таким образом, рассмотренную модель поверхности  $\Sigma_0$  можно сколь угодно плотно обмотать одной нитью. Но эта намотка нерегулярна, т.е. в одних местах нить будет намотана достаточно плотно, а в других будут иметь место пустоты.

В случае рассмотрения покрытия оправки лентой из нитей, ширина которой  $b = \xi$  там же было показано, что для любой поверхности  $\Sigma_0$  можно подобрать такое положительного значения  $\xi$ , что геодезическая линия на ней касающаяся края, задает на нем конечную сеть диаметра меньше  $\xi$ . Линиями этой сети вся поверхность разбивается на криволинейные треугольники и четырехугольники, стороны которых меньше  $\xi$  и геодезическая линия обматывает поверхность  $\Sigma_0$  регулярным образом и сколь угодно плотно, то есть расстояние от любой точки поверхности  $\Sigma_0$  до ближайшей линии сети можно сделать сколь угодно малым.

Исходя из данных замечаний, для практической реализации метода намотки в качестве основных параметров определяющих рисунок намотки оболочки изделия в виде тела вращения устанавливаются:

$\xi$  - угол охвата лентой из нитей оправки при одном возвратно-поступательном ходе раскладочной головки намоточного станка;

$m$  - заходность намотки, т. е. количество возвратно-поступательных движений раскладочной головки (ролика) к моменту достаточно близкого замыкания траектории намотки;

$t$  - шаг намотки, определяющий некоторое смещение армирующей ленты по окружной координате поверхности (например, смещение по максимальному

периметру оправки на ширину ленты, необходимое для равномерного покрытия армирующим материалом всей поверхности оправки).

Очевидно, что угол охвата  $\xi$ , заходность  $m$  и шаг  $t$  намотки (выраженный в радианах между соседними лентами в сечении с координатой  $z = \text{const}$ ) для обеспечения плотной намотки должны быть связаны между собой зависимостью

$$\xi m = 2\pi k \pm t, \quad (3.1.2)$$

где  $k$  - целое число.

Для обеспечения равномерного распределения лент по поверхности оправки шаг намотки  $t$  должен удовлетворять следующему равенству:

$$t = 2\pi / n, \quad (3.1.3)$$

где  $n$  - число витков ленты в одном слое намотки, реализуемое при условии их равномерного распределения в рассматриваемом сечении.

Очевидно, что число  $n$  всегда кратно числу  $m$ . Учитывая данное замечание для  $t$ , получим что:

$$\xi = \frac{2\pi}{m} \left( k \pm \frac{1}{n} \right), \quad (3.1.4)$$

Ввиду того, что  $k, m, n$  целые числа угол охвата  $\xi$ , является также дискретной величиной.

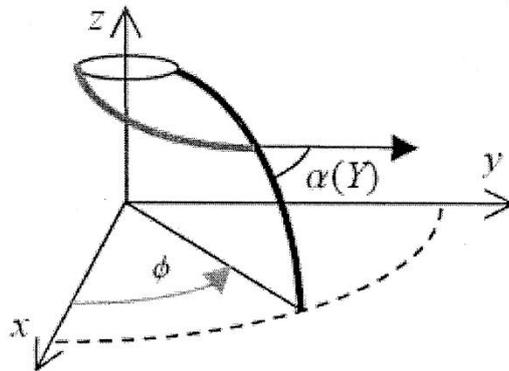


Рис. 3.1.1 Угол охвата

С другой стороны, теоретический угол охвата  $\xi_0 = 2\Delta\varphi$  зависит от формы рассматриваемой поверхности оправки и траектории на ней, по которой

укладывается лента армирующего материала, а также от параметров исполнительных органов намоточного станка и может быть определен в виде:

$$\xi_0 = \xi_t + \xi_e, \quad \xi_t = \int_0^s \frac{\sin \varphi}{\rho} ds$$

или 
$$\xi_t = 2 \int_0^L \frac{\operatorname{tg} \varphi \sqrt{\rho^2 + z^2}}{\rho} dz \quad (3.1.6)$$

$\xi_t$  - теоретический угол охвата траектории,  $\xi_e$  - поправка, вводимая при выборе параметров исполнительных органов станка.

Здесь приняты обозначения:  $\rho, \varphi$  - соответственно радиус параллели оправки, угол между меридианом оправки и траекторией ленты (угол армирования),  $L$  - длина оправки (расстояние между точками касания краев оправки),  $S$  - длина одного витка армирующей ленты.

Необходимое число витков лент для образования слоя может быть назначено исходя из любых предположений, например, из условия закрытия поверхности на определенном диаметре или, например, из условия образования слоя на экваторе днища цилиндрического баллона с постоянной толщиной  $h_0$ .

При рассмотрении второго примера значение  $h_0$  может быть определено из условия постоянства объема используемых нитей в каждом сечении получаемой оболочки, выражаемого соотношением:

$$n_0 = \frac{2\pi\rho_0 h_0 \cos \varphi_0}{2(F_l \pm \Delta)}, \quad (3.1.7)$$

где  $F_l$  - площадь сечения ленты,  $\Delta$  - нахлест или зазор укладки лент, выраженные через долю площади сечения ленты. При этом число витков лент  $n_0$  округляется до ближайшего целого числа.

Определяемый выше необходимый угол охвата  $\xi_0$  лентой оправки, зависящий от заданного размера меридиана оправки и траектории намотки ленты, обычно не совпадает ни с одним из дискретных значений угла  $\xi$ . Варьируя значением  $n_0$  (или углом армирования, шириной и зазорами

укладываемой ленты), можно подбирать целое  $n_0$ , близкое к  $n$  и минимальные значения  $k$  и  $m$ , так чтобы подученное значение  $\xi_0$  отличалось от  $\xi$  на величину не более некоторой малой величины  $\lambda$ . Таким образом, при заданном разбросе в количестве витков ленты в одном слое намотки  $n - n_0 = \Delta n$ , обусловленном параметрами слоя, для обеспечения достаточно равномерного покрытия оправки наматываемым слоем ленты и минимального отличия реализуемой при намотке траектории ленты от расчетной траектории должно выполняться условие  $|\xi - \xi_0| = \Delta \xi \leq \lambda$ .

Программные намоточные станки обычно имеют импульсное управление. Например, при одном импульсе на привод по координате поворота оправки она поворачивается на некоторый угол  $\Delta \beta$ , составляющий тысячные доли радиана. Аналогичные действия происходят и в приводах исполнительных органов станка по другим координатам.

В управляющей программе, обеспечивающей намотку на станке одного витка ленты, также должно содержаться целое число импульсов  $N$  или должна задаваться требуемая точность перемещения исполнительных органов. Таким образом, при выполнении программы возможно достаточно точно подобрать значение угла охвата  $\xi$  к теоретическому.

В целом для обеспечения реализации исполнительной программы станка необходимо выполнение следующего алгоритма:

Задаются серии ближайших целых значений  $\Delta \xi$  от нуля в положительную и отрицательную стороны. При заданных значениях  $\Delta \xi$  находятся серии минимальных значений  $m$  и  $n$  таких, чтобы  $n$  минимально отличалось от  $n_0$  (при этом  $n$  и  $n_0$  округляются до целых чисел). Определяются серия минимальных значений  $\Delta \xi$  и  $\Delta n$ , из которых компромиссно выбирается пара  $\Delta \xi$  и  $\Delta n$ , удовлетворяющая как по углу охвата ( $\Delta \xi$ ), так и по числу витков ленты в слое намотки ( $\Delta n$ ). По выбранному значению  $\Delta \xi$ , уточняется закон  $\varphi = \varphi(z)$  и другие параметры намотки или нулевые настройки исполнительных

органов намоточного станка, (в некоторых случаях может уточняться расчетная форма меридиана оправки  $\rho = \rho(z)$ ).

Таким образом, требование равномерного покрытия оправки при намотке слоя или выполнение любого другого требования, приводит при реализации исполнительной программы станка к необходимости корректировки в первую очередь нулевых настроек исполнительных органов (положение и размеры раскладывающей головки, количество движений (координат) исполнительных органов и ряд других), расчетной траектории нити на оправке, параметров обеспечения слоя и т.д.

Для намотки слоя в оболочке вращения программа намотки составляется для одного витка ленты. Намотка одного слоя осуществляется путем многократного исполнения программы, продублированной  $n$  раз. Если намотка оболочки многослойная, тогда программа намотки составляется для одного витка каждого слоя с учетом его особенностей.

Оболочки вращения, изготовленные методом непрерывной намотки по траектории одного витка, обеспечивающей равномерное покрытие наматываемой лентой всей поверхности оправки, относятся к классу односемейных оболочек. Рисунок укладки лент на поверхности оболочки в этом случае обладает цилиндрической симметрией, т.е. каждый единичный участок линии параллели оболочки с координатой пересекает одинаковое количество лент под углами. При полном покрытии оправки наматываемой лентой образуется двойной слой намотки, состоящий из моноотропного слоя левого вращения с углом укладки лент и моноотропного слоя правого вращения с углом (рис. 3.1.2). Ленты каждого моноотропного слоя равномерно распределены по поверхности оправки. Ленты моноотропного слоя левого вращения регулярно пересекаются с лентами моноотропного слоя правого вращения, образуя на поверхности оболочки характерный рисунок намотки.

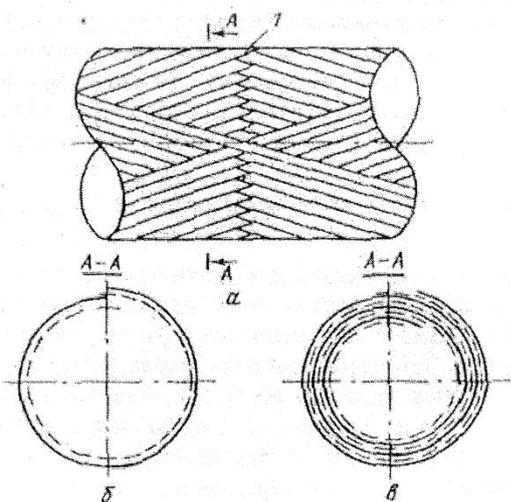


Рис. 3.1.2 Двойной слой намотки

При продолжении намотки после полного покрытия оправки одним двойным слоем ленты образуется второй двойной слой и т.д. Многослойная ( $k$ -слойная) односеменная оболочка имеет регулярную слоистую структуру по толщине оболочки, состоящую из  $k$  двойных слоев намотки (рис. 3.1.3). Слои намотки укладываются в виде спиралей. Количество спиралей равно удвоенной заходности намотки  $m$ , Длина всех спиралей в одном слое одинаковая. Угол охвата одной спирали  $\xi$  зависит от заходности  $m$  и от числа намотанных слоев  $k$ .

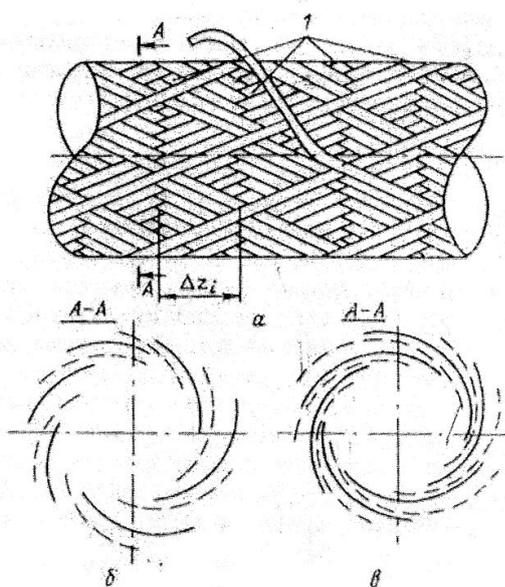


Рис. 3.1.3 Многослойная оболочка

При движении вдоль координаты  $z$  спирали смещаются по координате  $\xi$  (сохраняя свою угловую длину  $\xi_{sp} = const$ ) по закону  $d\xi = \pm \frac{tg\varphi}{\rho} dz$  соответственно для слоев правого и левого вращений. Суммарное смещение спиралей слоев правого и левого вращений относительно друг друга  $d\xi = 2 \frac{tg\varphi}{\rho} dz$ .

По мере продвижения спиралей слоев правого и левого вращений по координате  $z$  в определенных сечениях с координатами  $z_i$  происходит совпадение их концов. В этих сечениях происходит смена положения слоев правого и левого вращений: внутренний слой (лента внутреннего слоя) выходит наружу, а наружный слой уходит вовнутрь. При дальнейшем продвижении вдоль координаты  $z$  смена положения слоев повторяется. На поверхности оболочки места смены положения слоев имеют вид зубчатого рисунка, опоясывающего оболочку по ее широте (рис. 3.1.4). Два соседних зубчатых рисунка на поверхности оболочки находятся друг от друга на расстоянии  $\Delta z_i = z_{i+1} - z_i$ , на котором относительное угловое смещение спиралей слоев правого и левого вращений составляет:

$$2\pi / m = 2 \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{tg\varphi + \rho^2 \pi^2}{\rho} dz \quad (3.1.8)$$

Угол охвата лентой оправки  $\xi_0$  при замыкании рисунка намотки (при возвращении лент при намотке в исходную точку отсчета) можно определить по внешнему виду рисунка намотки с точностью до шага намотки  $t$  по зависимости  $\xi_0 = 2\pi(l+1) \pm t$ , где  $l$  число пересечений на поверхности оболочки слоев правого и левого вращения (число зубчатых поясов), за один цикл движения раскладочной головки (одно возвратно-поступательное движение головки) лента охватит оправку на угол  $\xi = \frac{\xi_0}{m}$ .

Некоторые технологические параметры: текс, ширина ленты, ширина разложенного жгута, количество жгутов, толщина слоя, связь ее при изменении

диаметра слоя, очередность слоев, некоторые особенности в структуре пакета, прочность жгута - связаны с прочностью композита. Эта методика используется при разработке технологических процессов баллонов высокого давления БК-7 и БК-8.

### 3.2. Некоторые соображения по расчету параметров исполнительных органов намоточного станка

Как уже отмечалось выше, при работе станка в общем случае для реализации укладки армирующих нитей или волокон по некоторым заданным траекториям на оправках с поверхностями общего вида используют следующие движения его исполнительных органов: - вращательное движение оправки (характеризуется угловой координатой  $\pm \xi$ ); - поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки вдоль оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm x$ ); - поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm y$ ); - поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm z$ ); - поворот раскладочной головки относительно оси  $y$  (характеризуется угловой координатой  $\pm \alpha$ ); - поворот раскладочной головки относительно оси  $z$  (характеризуется угловой координатой  $\pm \beta$ ). В настоящем разделе приведем некоторые соображения, касающиеся определения указанных координат исполнительных органов намоточного оборудования.

Предварительно определим процедуру построения координат точек траектории укладки нитей на поверхности оправки.

Пусть задана геометрия оправки с поверхностью вращения  $\Sigma_0$ , описываемая в прямоугольной системе координат  $\{0, x, y, z\}$  уравнением  $\rho(\omega, x) = r(x)e(\omega) + xk\rho$ , где ось вращения  $0z$  направлена вдоль координаты  $z$ .



$$dx = \frac{\cos \varphi}{(1+r'^2)^{1/2}} ds_1 \quad (3.2.5)$$

$$dx = \frac{r' \cos \varphi}{(1+r'^2)^{1/2}} ds_1 \quad (3.2.6)$$

$$d\xi = \frac{\sin \varphi}{r} ds_1 \quad (3.2.7)$$

Интегрируя данные соотношения, для определения координат точек траектории  $\varphi = \varphi(x)$  на поверхности  $\Sigma_0$ , получаем:

$$x = \int_0^s \frac{\cos \phi}{(1+r'^2)^{1/2}} ds_1 \quad (3.2.8)$$

$$r = \int_0^s \frac{r' \cos \phi}{(1+r'^2)^{1/2}} ds_1 \quad (3.2.9)$$

$$\xi = \int_0^s \frac{\sin \phi}{r} ds_1 \quad (3.2.10)$$

Для оболочки образованной участками канонических поверхностей, при условии укладки армирующих лент по траекториям геодезических линий, возможно задание траектории в виде связанных между собой отдельных участков геодезических для каждого участка.

Отметим, что задаваемая траектория  $\varphi = \varphi(x)$  укладки армирующих нитей зависит от параметров рассматриваемой поверхности. Однако траектория  $\varphi = \varphi(x)$  укладки нити может задаваться на поверхности в любом виде и не обязательно должна находиться в классе геодезических данной поверхности [81]. В данном случае необходимо проведение оценки устойчивости нити на поверхности, на базе отмеченных выше ограничений по трению и нормальной кривизне траектории.

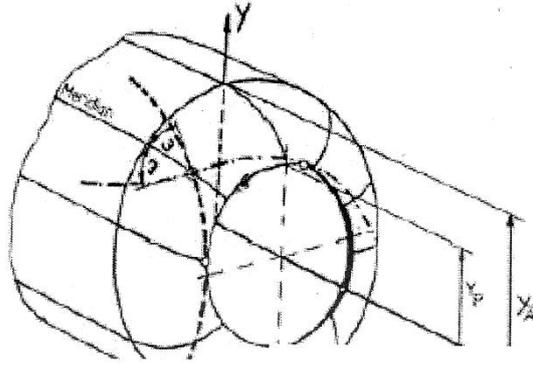


Рис. 3.2.2 Пример намотки на орбите

Чрезмерное отклонение траектории от геодезических направлений на поверхности, как уже отмечалось ранее, может приводить к сползанию нити в процессе намотки с данной поверхности. Приведем зависимости, позволяющие провести оценку ограничения по сползанию нити на поверхности вращения.

Предельное отклонение от геодезического направления на поверхности определяется соотношением  $|tg\theta| = |tg\theta_{hm} = k|tg\Theta| = |tg\Theta_{hm}| = k$ , где  $tg\theta = -\frac{\rho_n}{\rho_g}$

Здесь  $\rho_n, \rho_g$  - радиусы нормальной и геодезической кривизны нити на поверхности.

Учитывая, что:

$$\frac{1}{\rho_n} = \frac{\cos^2 \varphi}{\rho_1} + \frac{\sin^2 \varphi}{\rho_2}, \frac{1}{\rho_g} = -\frac{\cos \gamma}{r} + \frac{d(\sin \varphi)}{d\varphi}, \frac{1}{\rho_1} = \frac{d \sin \gamma}{dr}, \frac{1}{\rho_2} = \frac{\sin \gamma}{r} \quad (3.2.11)$$

из приведенных выше соотношении получим:

$$tg\theta = \frac{\cos \gamma}{\cos^2 \varphi \frac{d \sin \gamma}{dr} + \sin^2 \varphi \frac{\sin \gamma}{r}} \frac{d(\sin \varphi)}{r dr} \quad (3.2.12)$$

Здесь  $\gamma$  - угол между нормалью к поверхности и осью ее вращения.

Приравнивая правую часть данного соотношения к коэффициенту  $k$  получим следующее уравнение относительно  $\varphi$ :

$$\frac{d(\sin \varphi)}{dr} = \pm k \left( \frac{tg\gamma}{r} - \frac{1}{\cos \gamma} \frac{d \sin \gamma}{dr} \right) \sin^2 \varphi - \frac{\sin \varphi}{r} \pm k \frac{1}{\cos \gamma} \frac{d \sin \gamma}{dr}, \quad (3.2.13)$$

которое определяет траекторию предельного отклонения нити от геодезического направления на рассматриваемой поверхности вращения.

В общем случае решение данного уравнения достаточно трудоемко, поэтому более целесообразно на практике использовать простейшие решения, разбивая поверхность на отдельные участки с классическими поверхностями.

В частных случаях классических поверхностей вращения решения данного уравнения имеют вид:

$$\text{–цилиндр радиусом } R : \sin \varphi = \frac{R}{(R + kx)};$$

$$\text{–конус с углом при вершине } \alpha : \sin \varphi = \frac{1}{(Cr \pm kctg\alpha)};$$

$$\text{–сфера радиусом } R : \sin \varphi = \frac{1}{R}(C \pm k\sqrt{R^2 - r^2}).$$

Таким образом, при построении на поверхности вращения траектории по некоторому закону  $\varphi = \varphi(x)$  по описанному выше алгоритму строится траектория предельного отклонения нити от геодезического направления. Сравнивая траекторию по заданному закону  $\varphi = \varphi(x)$  и траекторию по закону  $\varphi = \varphi_{\text{lim}}$  проводится корректировка траектории  $\varphi = \varphi(x)$ , так чтобы она находилась в границах  $\varphi = \pm\varphi_{\text{lim}}$ . Отметим, что определяющим в данном случае является коэффициент трения  $k$ , который может быть изменен благодаря различным технологическим способам в процессе намотки нити. В данном случае, сохраняя закон укладки нити  $\varphi = \varphi(x)$  определяется закон изменения коэффициента трения вдоль траектории  $\varphi = \varphi(x)$ .

Отметим также, что данные соотношения справедливы при рассмотрении траектории в виде безразмерной линии. На практике намотку ведут лентой определенной ширины  $b$  и траекторию для укладки ленты определяют по срединной линии или крайним нитям.

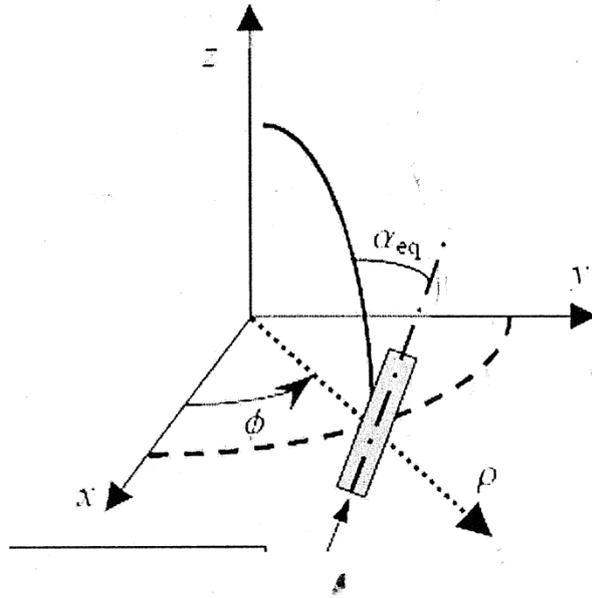


Рис. 3.2.4 Траектории укладки лент

Поэтому, при проведении анализа траектории укладки лент также аналогичным образом проводится оценка устойчивости крайних нитей ленты, расположенных по траекториям  $\varphi_i, \varphi_k$  (рис. 3.2.4).

### 3.3. Методика выбора параметров траектории исполнительных органов станка

Таким образом, определив траекторию на поверхности оправки, основной задачей программирования является задача определения законов движения исполнительных органов станка при наличии ряда установленных ограничений, как по устойчивости намотки нити, так и по предельным значениям перемещений, скоростей и ускорений движения исполнительных органов станка.

Рассмотрим сначала случай станка с тремя управляемыми исполнительными органами (трех координатный станок). В данном случае исполнительные органы могут совершать три движения - вращательное движение оправки (характеризуется угловой координатой  $\pm \xi$ ); - поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки вдоль оси

вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm x$ ); - поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm y$ ).

Исходя из геометрических соображений представленных на рис. 3.3.1 построим алгоритм определения координат  $(\pm \xi, \pm x, \pm y)$  по известному положению траектории  $\varphi = \varphi(x)$  на поверхности.

Пусть  $\beta$  - угловая координата точки М, являющейся точкой схода нити с траектории поверхности оправки. Определим координаты положения раскладывающей головки станка (точка  $\pm K$ ) в зависимости от положения точки

$M(x, r, \beta)$  принадлежащей траектории укладки нити на поверхности.

Очевидно, что натянутая нить на участке от точки схода М до точки контакта с раскладывающей головкой  $\pm K$ , является прямой линией, лежащей в соприкасающейся в точке М с поверхностью оправки плоскости  $\Omega$ .

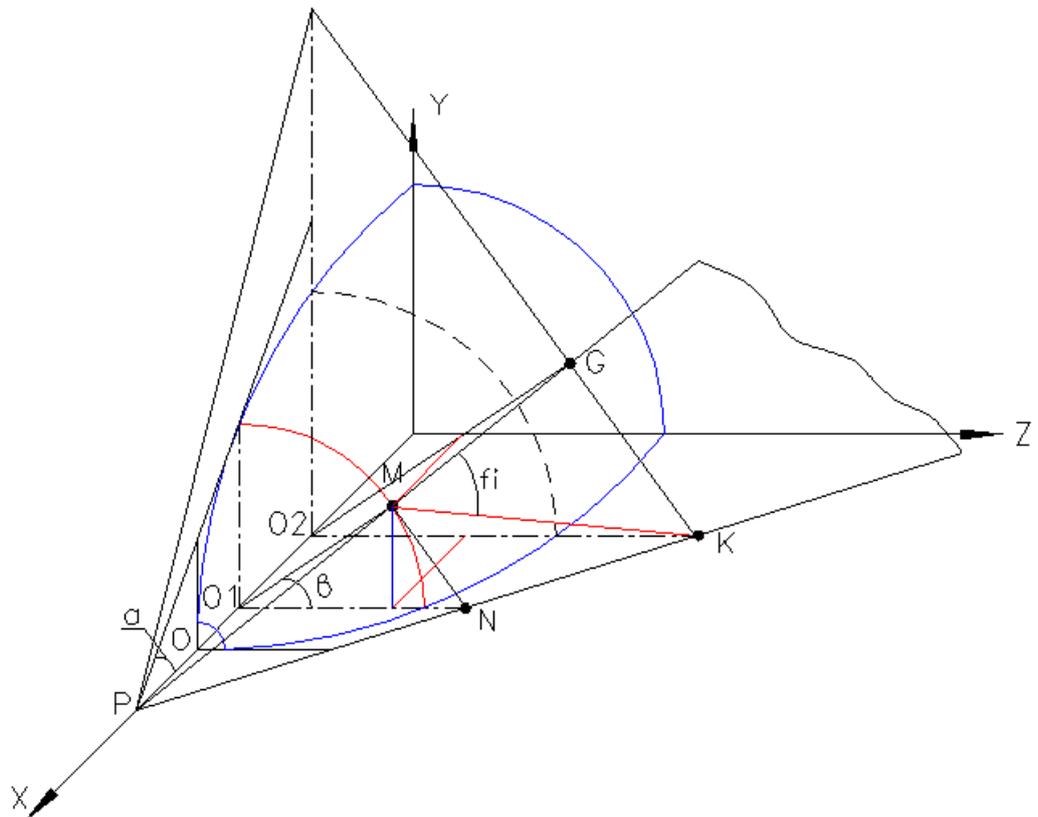


Рис. 3.3.1 Структура плоскостей

Исходя из этого из геометрических соображений, представленных на рис.

3.3.1 имеем:

$$\begin{aligned}
 O_1N &= \frac{r}{\cos \beta}, MN = rtg\beta, \angle PMN = \frac{\pi}{2}, \angle MPN = \gamma, MP = \frac{r}{\sin \alpha}, \\
 tg\alpha = r' &= \frac{dr}{dz}, tg\gamma = \frac{MN}{MP} = tg\beta \sin \alpha, MQ = \frac{\Delta z}{\cos \alpha}, QK = \Delta z tg\varphi \cos \alpha, \\
 MK &= \frac{\Delta z}{\cos \alpha \cos \varphi}, x_k = \frac{\Delta z tg\varphi}{\cos \alpha \sin \beta}, MK_+ = d_+ = \frac{r \cos \gamma tg\beta}{\sin(\varphi - \gamma)}, \\
 MK_- = d_- &= \frac{r \cos \gamma tg\beta}{\sin(\varphi + \gamma)}, NK_+ = l_+ = \frac{r \cos \varphi tg\beta}{\sin(\varphi - \gamma)}, NK_- = l_- = \frac{r \cos \varphi tg\beta}{\sin(\varphi + \gamma)}.
 \end{aligned} \tag{3.3.1}$$

Или, учитывая изменение знака производной  $tg\alpha = r'$  при изменении направления движения по профилю поверхности имеем:

$$MK_{\pm} = d_{\pm} = \frac{r \cos \gamma tg\beta}{\sin(\varphi - \gamma)}, NK_{\pm} = l_{\pm} = \frac{r \cos \varphi tg\beta}{\sin(\varphi - \gamma)}. \tag{3.3.2}$$

Используя определение длины вектора и учитывая, что координаты точки М  $(z_0, r \cos \beta, r \sin \beta)$ , точки N  $(z_0, r / \cos \beta, 0)$  и точки +К  $(z_k, x_k, 0)$ , получаем следующую систему алгебраических уравнений для определения координат центра раскладывающей головки станка:

$$d_+^2 = (z_k - z_0)^2 + (x_k - r \cos \beta)^2 + r^2 \sin^2 \beta \tag{3.3.3}$$

$$l_+^2 = (z_k - x_0)^2 + (x_k - r / \cos \beta)^2$$

решение которой, дает:

$$\Delta z_k = z_k - z_0 = \frac{rtg\beta \cos \alpha}{tg\varphi - tg\beta \sin \alpha} \tag{3.3.4}$$

$$x_k = \frac{rtg\varphi}{\cos \beta (tg\varphi - tg\beta \sin \alpha)}$$

$$\Delta x_k = x_k - x_0 = \frac{r}{\cos \beta (tg\varphi - tg\beta \sin \alpha)} - r \cos \beta$$

При этом в предельных точках получаем:

$$r = r_0, r' \rightarrow \infty, \gamma \rightarrow \beta, \varphi = \frac{\pi}{2}, x = \frac{r_0}{\cos \beta_0}, z = 0, \beta > 0; \tag{3.3.5}$$

$$r = R, r' \rightarrow 0, \gamma \rightarrow 0, \varphi = \varphi_R, x = \frac{R}{\cos \beta_R}, z = \frac{Rtg\beta_R}{tg\varphi_R}, \beta > 0;$$

Таким образом, устанавливая некоторый закон положения точки сходимости с траектории  $\beta = \beta(z)$ , положение координат  $z, x$  исполнительной головки станка определяется однозначно. При этом угол  $\theta$  между вектором скорости  $v_0$  и его проекцией  $v_1$  на плоскость  $XZ$  может быть определен из следующего соотношения:

$$\sin \theta = \frac{r \sin \beta}{MN} = \frac{r \sin \beta \cos \alpha \cos \varphi}{\Delta z} = \cos \beta \cos \alpha \left[ g \varphi - tg \beta \sin \alpha \right] \quad (3.3.6)$$

а угол  $\theta$  между векторами скоростей  $v_{xk}$  и  $v_{zk}$  выражается в виде:

$$tg \theta = \frac{v_{xk}}{v_{zk}} = \frac{\Delta x}{\Delta z} = \frac{1}{\sin \beta \cos \alpha} \left[ -\cos^2 \alpha \left[ g \varphi - tg \beta \sin \alpha \right] \right] \quad (3.3.7)$$

Используя данное соотношение и учитывая, что  $v_0 = v_{xk}^2 + v_{zk}^2$  при известном значении  $v_0$  однозначно определяются и скорости  $v_{xk}$  и  $v_{zk}$  для раскладывающей головки К.

Рассмотрим случай станка с четырьмя управляемыми исполнительными органами (четырёх координатный станок), в котором исполнительные органы могут совершать четыре следующих движения - вращательное движение оправки (характеризуется угловой координатой  $\pm \xi$ ); - поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки вдоль оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm x$ ); поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm y$ ), - поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой  $\pm z$ ) (рис. 3.3.1).

Аналогично, как и в предыдущем случае, используя определение длины вектора и учитывая, что координаты точки М ( $x_0, r \cos \beta, r \sin \beta$ ), точки

N ( $x_0, r/\cos \beta, 0$ ) и точки +К ( $x_+, y_+, z_+$ ) получаем следующее решение для определения координат центра исполнительной головки станка:

$$y_k = \text{var}$$

$$\Delta z_k = z_k - z_0 = \frac{r \cos \alpha \sin \beta \mp y_k}{\cos \beta (\varphi - \text{tg} \beta \sin \alpha)} \quad (3.3.8)$$

$$x_k = \frac{1}{\cos \beta} \left( \frac{r \text{tg} \varphi}{\varphi - \text{tg} \beta \sin \alpha} \mp y_k \right)$$

В предельном случае  $y_k = 0$  и данные соотношения переходят в соотношения (3.3.9).

Вторым предельным значением координаты  $y_k$  является ее значение  $y_k = y_0$ . В данном случае положение раскладывающей головки совпадает с точкой схода армирующей ленты с поверхности оправки. То есть в предельном случае  $y_k = y_0$  раскладывающая головка будет ползать по поверхности оправки по задаваемой траектории армирования. Таким образом, зная положение точек траектории на поверхности и задавая некоторый закон  $\beta = \beta(z)$  для положения точки схода армирующей нити с поверхности оправки используя приведенные выше соотношения однозначно можно определить координаты и скорости движения раскладывающей головки (движения исполнительных органов) станка.

Для установления закона  $\beta = \beta(z)$  рассмотрим положение, что радиус - вектор точки К равен сумме радиус - вектора точки М и некоторого вектора, направленного вдоль касательной МК:

$$r_k = r_m + \|d\| \tau, \quad (3.3.9)$$

где  $\|d\| = d_{\pm}$  - расстояние от точки М до точки К.

Из определения касательной к кривой имеем:

$$\tau = \frac{dx}{ds} i + \frac{dy}{ds} j + \frac{dz}{ds} k \quad (3.3.10)$$

Учитывая определения касательной к кривой для координат радиус - вектора  $r_k$  в системе координат  $(X, Y, Z)$  получаем:

$$x_k = x_m + d \frac{dx_m}{ds} = x_m + d \frac{v_x}{v_0} \quad (3.3.11)$$

$$y_k = y_m + d \frac{dy_m}{ds} = y_m + d \frac{v_y}{v_0}$$

$$z_k = z_m + d \frac{dz_m}{ds} = z_m + d \frac{v_z}{v_0}$$

В силу того, что рассматривается трехкоординатный станок, координата центра раскладывающей головки  $y_k = 0$ .

Из данного ограничения получаем, что  $d \frac{dy_m}{ds} = d \frac{v_y}{v_0} = -y_m$ . Или учитывая,

что  $M(x, y, z) = M(x_0, r \cos \beta, r \sin \beta)$ :

$$\begin{aligned} d \frac{dz_m}{ds} &= \frac{d}{ds} \left( \sin \beta \right) \frac{dr}{ds} \sin \beta + r \cos \beta \frac{d\beta}{dr} \frac{dr}{ds} = \\ &= \frac{-r \sin \beta}{d} = \frac{dr}{ds} \left( \sin \beta + r \cos \beta \frac{d\beta}{dr} \right) = \frac{-r \sin \beta}{d} \end{aligned} \quad (3.3.12)$$

$$\tau = \frac{dx}{ds} i + \frac{dy}{ds} j + \frac{dz}{ds} k \quad (3.3.13)$$

$$r \cos \beta \frac{d\beta}{dr} = \frac{-r \sin \beta}{d} \frac{1}{\sin \alpha \cos \varphi} - \sin \beta \quad (3.3.14)$$

$$d = \frac{r \cos \gamma \operatorname{tg} \beta}{\sin \varphi - \gamma} \quad (3.3.15)$$

$$r \frac{d\beta}{dr} = \frac{-r \operatorname{tg} \beta \sin \varphi - \gamma}{r \cos \gamma \operatorname{tg} \beta} \frac{1}{\sin \alpha \cos \varphi} - \operatorname{tg} \beta \quad (3.3.16)$$

$$r \frac{d\beta}{dr} = \frac{-\sin \varphi - \gamma}{\cos \gamma} \frac{1}{\sin \alpha \cos \varphi} - \operatorname{tg} \beta \quad (3.3.17)$$

$$r \frac{d\beta}{dr} = -\frac{\sin \varphi \cos \gamma - \cos \varphi \sin \gamma}{\cos \gamma} \frac{1}{\sin \alpha \cos \varphi} - \operatorname{tg} \beta \quad (3.3.18)$$

$$r \frac{d\beta}{dr} = -\frac{\sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{tg} \gamma}{\sin \alpha \cos \varphi} - \operatorname{tg} \beta \quad (3.3.19)$$

$$r \frac{d\beta}{dr} = -\frac{\sin \varphi - \cos \varphi \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \beta}}{\sin \alpha \cos \varphi} - \operatorname{tg} \beta \quad (3.3.20)$$

$$r \frac{d\beta}{dr} = -\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sin \alpha} + \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} - \operatorname{tg} \beta \quad (3.3.21)$$

$$r \frac{d\beta}{dr} = -\frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sin \alpha} + \frac{2}{\operatorname{tg} 2\beta} \quad (3.3.22)$$

Преобразуя данное выражение с учетом приведенных выше соотношений, получим следующее уравнение:

$$\frac{d\beta}{dr} = -\frac{\operatorname{tg} \varphi}{r \sin \alpha} \quad (3.3.23)$$

решение которого будет иметь вид:

$$\beta \curvearrowright \equiv \beta_0 - \int \frac{\operatorname{tg} \varphi}{r \sin \alpha} dr \quad (3.3.24)$$

и определяет закон изменения точки схода нити с поверхности.

### 3.4. Особенности построения алгоритма расчета движения исполнительных органов станка

Для реализации движения исполнительных органов станка необходимо наличие предварительной информации, получаемой расчетным путем по вышеприведенным зависимостям с учетом геометрических, статических и других ограничений накладываемых на будущую траекторию укладываемых нитей на заданной поверхности. Ниже приведем особенности построения алгоритма, реализующего построения траекторий исполнительных органов станка.

Для построения расчетной программы задается форма поверхности, на которой производится намотка нити. Форма поверхности может задаваться в произвольном виде: аналитически или в виде числового массива (таблично). Причем форма может быть задана в любой системе координат, связанной с частью рассматриваемой поверхности. В конечном итоге задание формы приводится к некому числовому массиву. Например, на рис. 3.4.1 представлен профиль образующей поверхности состоящей из семи различных кривых. Для каждого вида кривой в локальной системе координат или глобальной системе задается числовой массив,  $\{X_k(I), Y_k(I)\}$ , описывающий данный участок образующей. Число точек задания кривой рассматриваемого участка устанавливается заданием значения счетчика  $\{I\}$ .

В наиболее простом варианте задание формы изделия в виде тела вращения возможно путем объединения нескольких участков, описываемых каноническими поверхностями второго рода. В конечном итоге форма изделия приводится к заданию некого массива точек в глобальной системе координат, связанной с выбранной точкой начала отсчета. Задание числовых значений массива производится в выбранных метрических единицах. Последующей операцией, автоматически выполняемой программой, является нормирование координат

профиля образующей поверхности  $\{X_k(I) = X_k(I)/M, Y_k(I)/M\}$ . В качестве нормирующего множителя  $\{M\}$  выбирается наибольшее по модулю значение координат в глобальной системе координат. Например, в рассматриваемом случае (рис. 3.4.1) в качестве нормирующего множителя  $\{M\}$  используется координата правого концевого сечения оболочки.

Последующим этапом работы программы является подпрограмма аппроксимации, полученной в виде матричного задания, формы образующей с использованием известных интерполяционных процедур, например, по методу Лагранжа или с использованием кубических сплайнов. В качестве контроля программа должна выдавать сравнение заданной формы с ее интерполяционным вариантом описания.

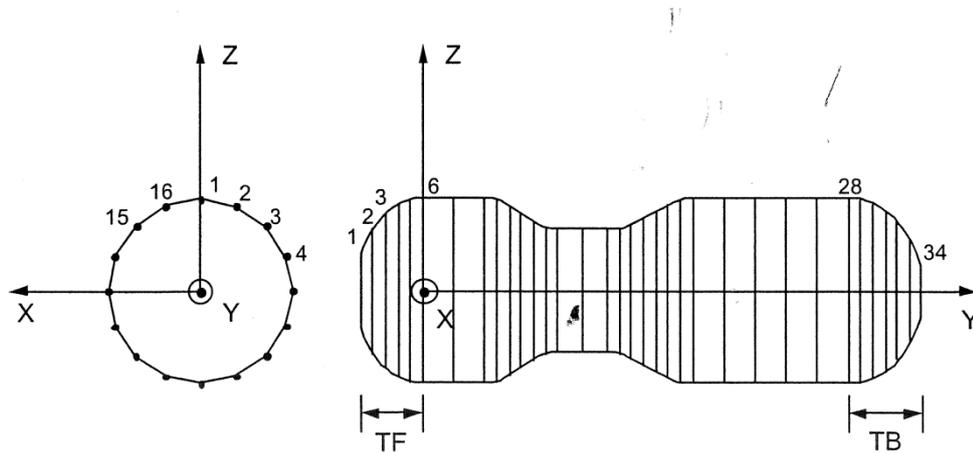


Рис. 3.4.1 Профиль образующей поверхности

Для реализации программы намотки задается желаемый закон используемой намотки (закон укладки нити на поверхности) с указанием начальных и конечных точек траектории. Задаются некоторые технологические параметры (например, ширина используемой для рассматриваемого станка нити, тип используемого связующего и волокна в виде коэффициента трения, ограничения на пути, скорости и ускорения исполнительных органов станка, геометрия используемой раскладывающей головки и другие.). На первоначальном этапе программа подбирает наиболее технологически выгодный вариант исполнения в виде числа заходности ленты и шага намотки для указанного варианта ширины ленты. Определяется угол охвата траектории и длина траектории на одном витке

охвата. На основании расчетных значений угла охвата и длины траектории, выбирается шаг движения по траектории на рассматриваемой поверхности. Как правило, шаг движения по траектории величина постоянная, что позволяет реализовать намотку с постоянной скоростью движения армирующей ленты и совместить ее со скоростью пропитки лены связующим. Строятся траектории для каждого витка укладываемой ленты. Одновременно с данной процедурой проводится оценка устойчивости ленты на данной траектории с учетом геометрических и статических ограничений. По полученным данным о траектории ленты на поверхности с использованием зависимостей, известных с учетом налагаемых ограничений, для конкретно рассматриваемого станка, строятся траектории движения исполнительных органов станка, которые в дальнейшем используются в виде числовых массивов для программ реализации в конкретном контроллере для данного станка.

В настоящее время одной из наиболее распространенных программ, реализующих алгоритм расчета траекторий намотки, является программный комплекс **CADWIN**. Данный комплекс представлен в удобном для пользователя интерфейсе, некоторые особенности которого представлены ниже.

Общий вид главного меню программы **CADWIN** представлен на рис. 3.4.2

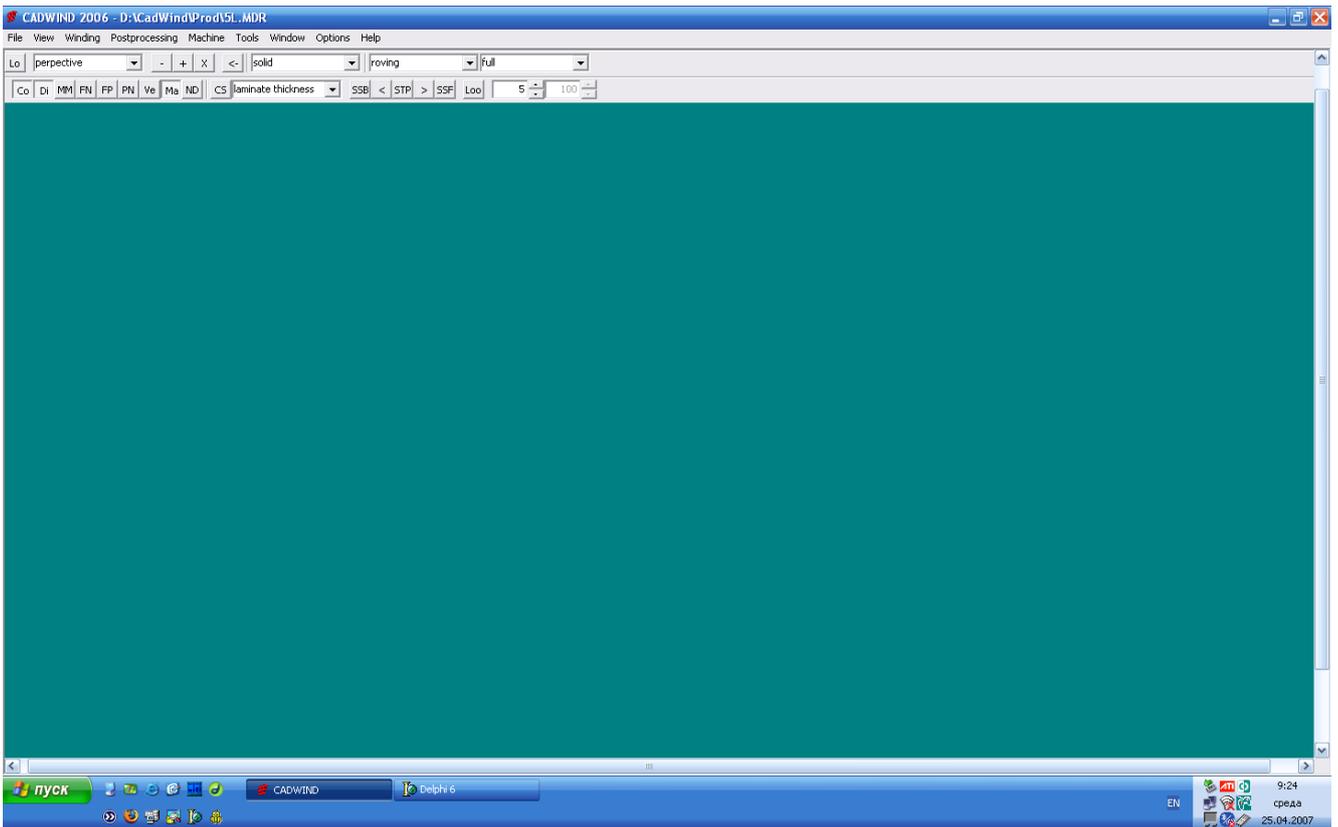


Рис. 3.4.2 Общий вид главного меню программы CADWIN

Для начала реализации проекта в меню выбирается закладка (рис. 3.4.3).

Рис. 3.4.3 Закладка программы CADWIN

где устанавливаются основные размеры геометрии оправки, на базе которых строится форма ее поверхности (рис. 3.4.4).

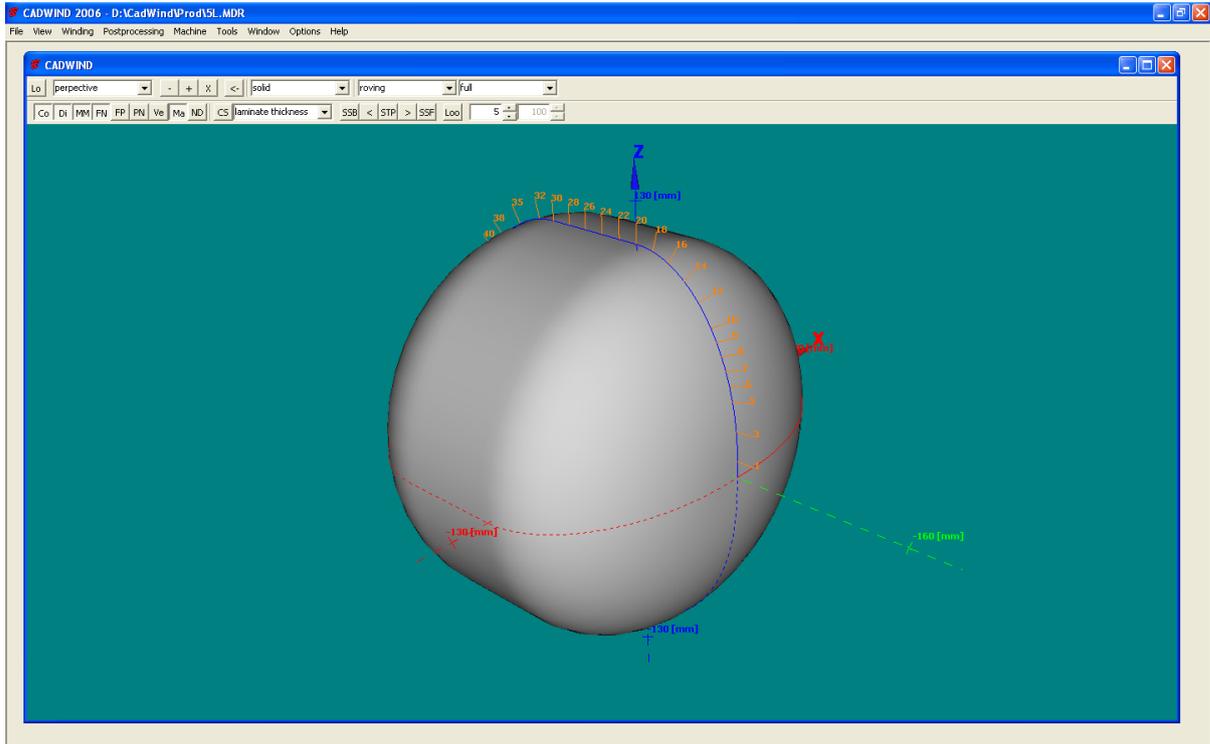


Рис. 3.4.4 Форма заданной поверхности

При удовлетворении аппроксимации формы желаемой, задаются параметры наматываемого материала: количество жгутов, их ширина, соотношение связующего и волокнистого материала (коэффициент армирования), линейная и объемные плотности жгутов и связующего (рис. 3.4.5).

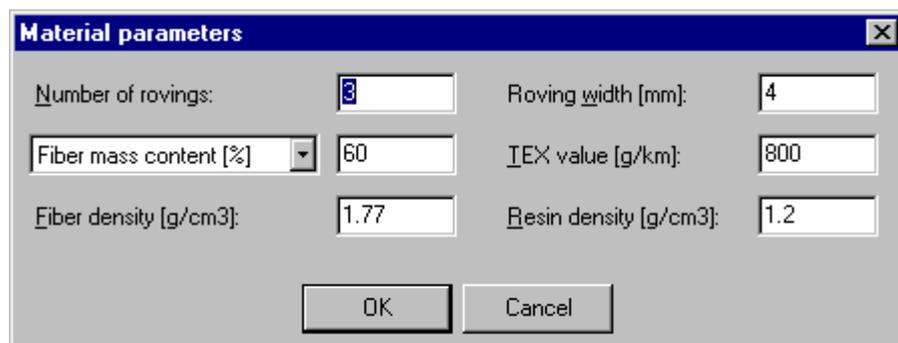


Рис. 3.4.5 Параметры наматываемого материала

Выбирается тип намотки (рис. 3.4.6) спиральная, плоскостная или другой и задаются некоторые параметры армирования, на базе которых представляется графическое изображение отдельных витков и наматываемого слоя на поверхности (рис. 3.4.7).

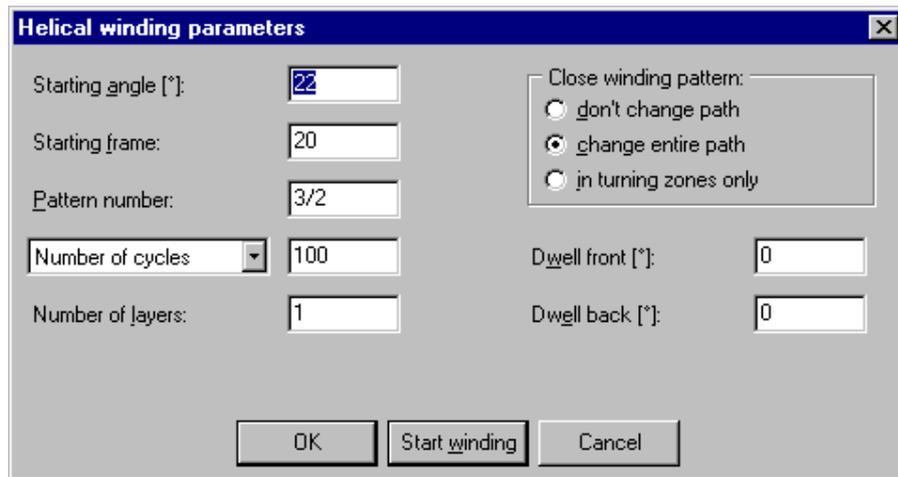


Рис. 3.4.6 Тип намотки

При удовлетворении требований по покрываемости поверхности и других, устанавливаются некоторые технологические ограничения на реализацию процесса намотки (рис. 3.4.9). В соответствии с данными ограничениями представляется графическое представление процесса намотки с указанием перемещений, скоростей и ускорений движения исполнительных органов станка (рис. 3.4.10). После некоторых коррекций пользователя (например, связывание нескольких программ в единую) получаемая информация представляется в виде отдельной программы в управляющую систему намоточного станка в принятой для нее системе команд, например M кодов.

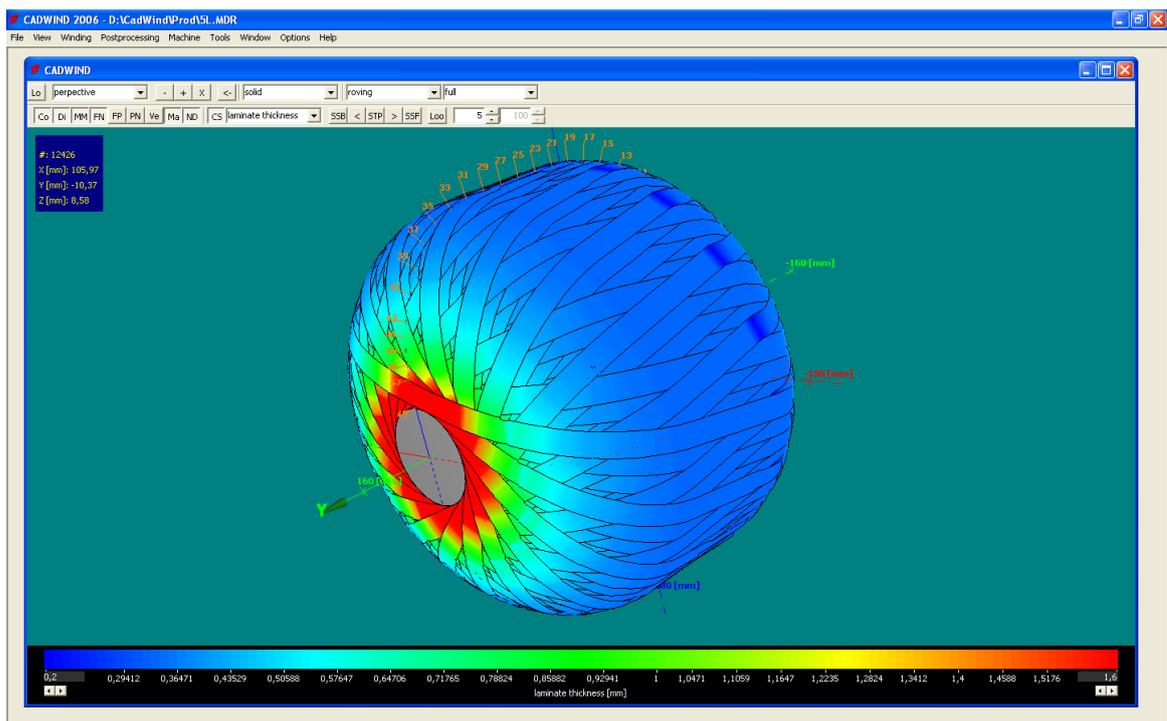


Рис. 3.4.7 Графическое отображение настройки

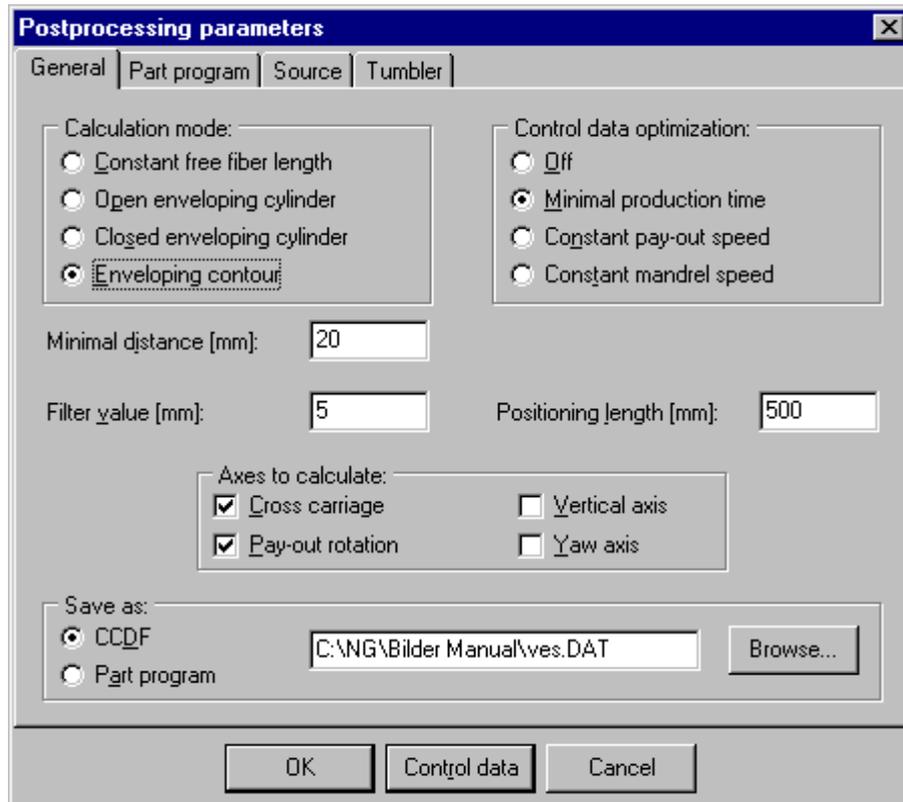


Рис. 3.4.8 Настройки процесса намотки

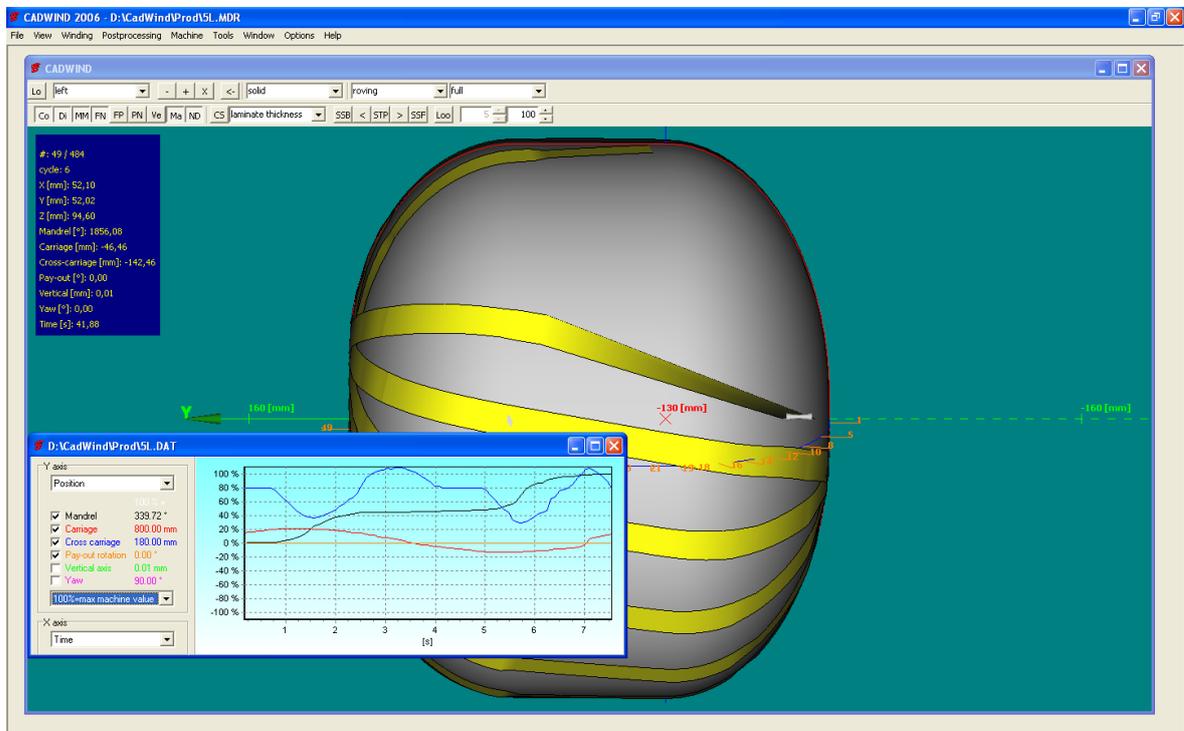


Рис. 3.4.9 Графическое отображение процесса намотки

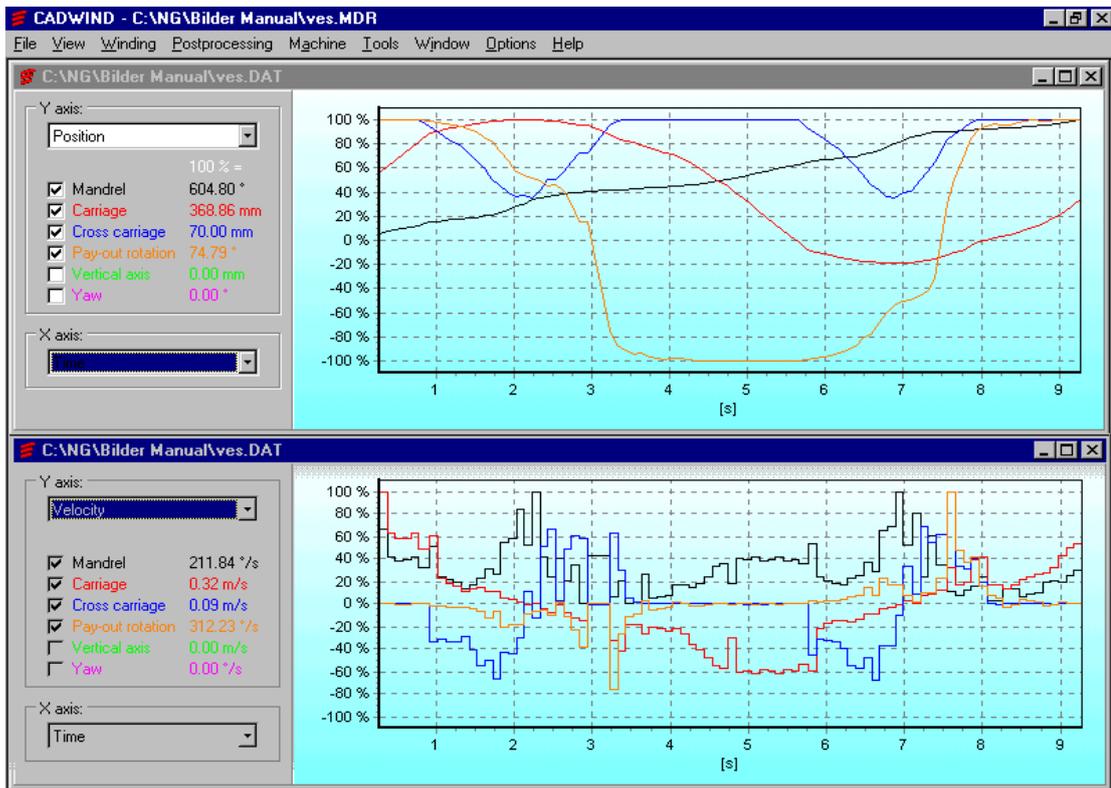


Рис. 3.4.10 Графическое представление процесса намотки

## ГЛАВА VI. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВОЙ ОБОЛОЧКИ КОРПУСА БАЛЛОНА (ПРОЧНОСТИ, ЖЕСТКОСТИ), ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ НАМОТКИ

Проектировочный расчет баллонов давления, выполненных из композиционных материалов методом непрерывной намотки, сводится к определению проектных параметров конструкции, обеспечивающих удовлетворение следующих условий: [34,47,51,52,56]

- 1) сохранение требуемой прочности (жесткости) при действии расчетных нагрузок;
- 2) обеспечение минимальной массы проектируемой конструкции;
- 3) технологическая реализуемость.

Основными параметрами баллонов давления, определяемыми в процессе проектирования, являются:

- 4) контуры днищ баллонов;
- 5) распределение углов армирования (углов ориентации армирующих волокон относительно меридиональных линий поверхности баллона);
- 6) количество слоев армирующего материала, образующих силовую оболочку.

### 4.1. Методика расчета оптимальных углов армирования и контуров днищ

При изготовлении силовых оболочек баллонов давления методом непрерывной намотки укладку армирующих нитей на поверхность оправки наиболее целесообразно производить по геодезическим линиям поверхности. Траектория намотки при этом определяется известным соотношением теории Клеро: [34,43]

$$r \sin \varphi = const, \quad (4.1.1)$$

где  $r$  - радиус оболочки,  $\varphi$  – угол армирования.

Целесообразность такой схемы армирования обусловлена следующими обстоятельствами:

1. При геодезической намотке нить, укладываемая на оправку, находится в равновесии даже при сколь угодно малом коэффициенте трения между оправкой и нитью, поскольку касательные усилия, действующие на нить в поперечном направлении, в данном случае отсутствуют.
2. Усилия в нитях, уложенных по геодезическим траекториям, при действии на баллон внутреннего давления оказываются постоянными по длине, что позволяет спроектировать равнопрочную силовую конструкцию.

Равенство (4.1.1) может быть переписано в следующем виде:

$$r \sin \varphi = r_0 = \text{const} \quad (4.1.2)$$

Здесь  $r_0$  - радиус полюсного отверстия, где, исходя из условия непрерывности намотки,  $\varphi = 90^\circ$ . Анализируя последнее соотношение, нетрудно видеть, что геодезическая намотка реализуема только в случае, когда радиусы полюсных отверстий одинаковы. Если же эти радиусы различны (рис. 4.1.1), значения функции Клеро  $r \sin \varphi$  лежат в диапазоне от  $r_{01}$  до  $r_{02}$ , где  $r_{01} < r_{02}$  - радиусы переднего и заднего полюсных отверстий соответственно. При этом условие (4.1.2), очевидно, не выполняется, и траектории укладки армирующих нитей на части баллона будут отличаться от геодезических. Такую намотку принято называть негеодезической.

Поскольку при негеодезической намотке армирующая нить удерживается от соскальзывания с поверхности оправки благодаря силам трения, очевидно, существует минимальное значение коэффициента трения между нитью и поверхностью, обеспечивающее статическое равновесие нити.

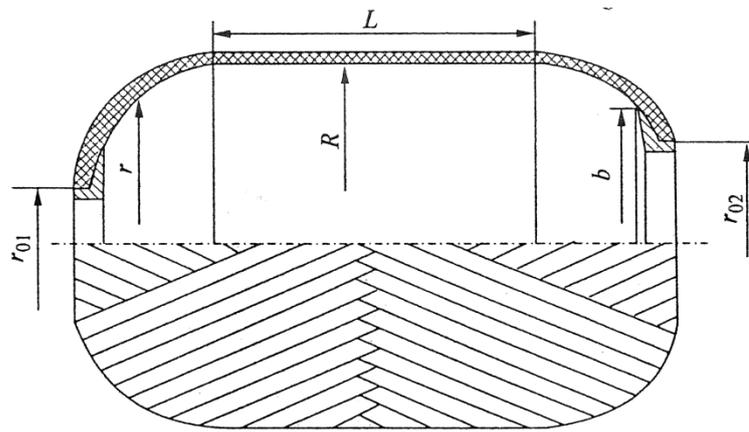


Рис. 4.1.1. Схема баллона давления

Математически это условие формулируется следующим образом: [80]

$$|\operatorname{tg}\theta| < k_{TP}, \quad (4.1.3)$$

где  $k_{TP}$  - коэффициент трения;  $\theta$  - угол между нормалью к поверхности оправки  $n$  и нормалью к траектории укладки нити  $v$ , называемый углом геодезического отклонения.

Руководствуясь определением угла геодезического отклонения и используя аппарат дифференциальной геометрии, нетрудно получить выражение для тангенса угла геодезического отклонения применительно к укладке нити на поверхность, образованную вращением кривой  $r = r(z)$  вокруг оси  $z$  :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\xi' r^2}{\xi^2 - \frac{r r''}{1 + r'^2} (r^2 - \xi^2)} \quad (4.1.4)$$

Здесь и в дальнейшем  $\xi = r \sin \varphi$  - обозначение, введенное для функции Клеро, а верхним штрихом обозначается операция дифференцирования по координате  $z$ .

Реализуемость (с точки зрения устойчивости нити на оправке) траекторий негеодезической намотки по заданному закону  $\xi = \xi(z)$  на поверхность вращения с заданной формой образующей  $r(z)$  может быть оценена по критерию (4.1.3) после определения тангенса угла геодезического отклонения по формуле (4.1.4).

Отметим, что траектории укладки армирующей нити, соответствующие  $|tg\theta| = const$ , принято называть линиями постоянного отклонения.

Очевидно, что случаю  $|tg\theta| = 0$  соответствует траектория, отклоняющаяся от траектории геодезической намотки, в наибольшей степени определяемой коэффициентом трения  $k_{TP}$ .

Конкретизируем основные проектные требования, сформулированные в общем виде в начале настоящего раздела.

Оптимальность проекта оценивается величиной массы оболочки баллона определяемой по формуле:

$$m = nfS_1\rho, \quad (4.1.5)$$

где  $n$  - число нитей, образующих силовую оболочку;  $f$  - приведенная площадь сечения нити с учетом связующего;  $S_1$  - длина нити между полюсами;  $\rho$  - плотность материала силовой оболочки.

Технологические ограничения сводятся к условию непрерывности нити при намотке (постоянства числа нитей, проходящих через любое сечение оболочки), математическая запись которого имеет вид:

$$nf = const. \quad (4.1.6)$$

Условие сохранения прочности формулируется следующим образом:

$$\sigma_{\max}(p) \leq \sigma, \quad (4.1.7)$$

где  $\sigma_{\max}(p)$  - максимальные напряжения в армирующих нитях, возникающие при действии внутреннего давления  $p'$ ,  $\sigma$  - допускаемые напряжения.

Проектным параметром в данном случае является зависимость функции Клеро от продольной координаты  $\xi = \xi(z) \sin \varphi(z)$ , однозначно определяющая траекторию намотки конструкции.

При проектировании баллона, изготавливаемого намоткой однонаправленной ленты, будем пренебрегать несущей способностью полимерного связующего, соединяющего отдельные нити в ленте, и заменим

ленту системой нитей, воспринимающих нагрузку только в направлении армирования. Такое упрощение допустимо, поскольку прочность однонаправленной ленты поперек армирования на 1-2 порядка меньше, чем в направлении армирования. Кроме того, физическая картина работы конструкции при нагрузках, близких к разрушающим, как правило, соответствует нитяной системе, так как разрушение связующего наступает существенно раньше исчерпания несущей способности оболочки [26,34,80].

Уравнения равновесия безмоментной оболочки вращения, нагруженной внутренним давлением  $p$ , для случая осесимметричного деформирования имеют вид:

$$\frac{d}{d\theta} (T_1 r) - T_2 R_1 \cos \theta = 0 \quad (4.1.8)$$

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} = 0$$

Здесь  $T_1, T_2$  - интенсивности меридиональных и кольцевых усилий, возникающих в оболочке;  $R_1, R_2$  - главные радиусы кривизны поверхности вращения (рис. 4.1.2).

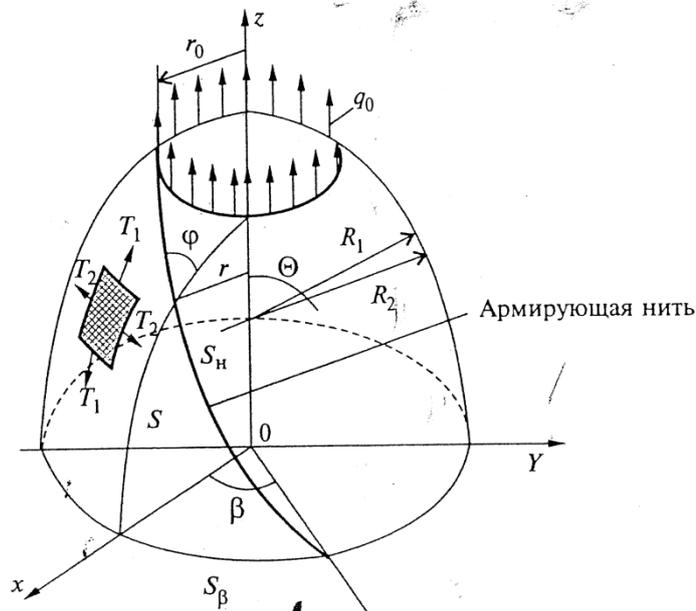


Рис. 4.1.2. Геометрическое представление оболочки вращения и расположение армирующей нити на днище сосуда давления

Используя известное соотношение  $R_1 \cos \theta d\theta = dr$ , первое уравнение равновесия из системы (4.1.8) можно записать в более простой форме:

$$\frac{d}{dr} (T_1 - T_2) = 0 \quad (4.1.9)$$

Меридиональные и кольцевые напряжения в оболочке  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  выражаются через напряжения в армирующих нитях  $\sigma$  следующим образом:

$$\sigma_1 = \sigma \cos^2 \varphi, \sigma_2 = \sigma \sin^2 \varphi. \quad (4.1.10)$$

Соответствующие выражения для меридиональных и кольцевых погонных усилий имеют вид:

$$T_1 = \sigma_1 h = h \sigma \cos^2 \varphi, T_2 = \sigma_2 h = h \sigma \sin^2 \varphi. \quad (4.1.11)$$

Здесь  $h$  - толщина оболочки, определяемая из условия непрерывности намотки (4.1.6) по формуле:

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} = 0 \quad (4.1.12)$$

Отметим, что формальное использование соотношения (4.1.12) для определения толщины оболочки в зоне полюсных отверстий (при  $\varphi \rightarrow 90^\circ$ ) приводит к получению бесконечно большой величины. Причиной этого является не учет формулой (4.1.12) того обстоятельства, что намотка осуществляется лентой конечной ширины. Поэтому теоретический результат  $h \rightarrow \infty$ , при  $\varphi \rightarrow 90^\circ$  на практике не реализуется и формулу (4.1.12) можно считать справедливой при удалении от края полюсного отверстия на расстояние, превышающее ширину ленты.

С учетом (4.1.12) соотношения (4.1.11) могут быть переписаны в виде:

$$T_1 = \frac{nf}{2\pi r} \sigma \cos \varphi \quad (4.1.13)$$

Непосредственно из (4.1.13) следует:

$$\frac{T_2}{T_1} = \tan^2 \varphi \quad (4.1.14)$$

Мысленно рассежем днище плоскостью, перпендикулярной оси вращения. Условие равновесия отсеченной части формулируется следующим образом:

$$q = q_0 \frac{r_0}{r} + p \frac{r^2 - r_0^2}{2r} \quad (4.1.15)$$

где  $q$  - осевое погонное усилие;  $q_0$  - осевое погонное усилие, действующее на контуре полюсного отверстия (рис. 4.1.2). Это осевое усилие уравнивается напряжениями в армирующих нитях:

$$q = \frac{nf\sigma}{2\pi r} \cos \varphi \sin \theta = \frac{nf\sigma}{2\pi R_2} \cos \varphi \quad (4.1.16)$$

Рассматривая второе уравнение равновесия (4.1.8), уравнения (4.1.14) и (4.1.16), нетрудно получить следующее соотношение:

$$\frac{R_2}{R_1} - \frac{2r^2}{r^2 - t_0^2} = -tg^2 \varphi \quad (4.1.17)$$

здесь  $t_0^2 = r_0^2 - \frac{2q_0 r_0}{p}$  - параметр, определяемый силовыми граничными условиями по контуру полюсного отверстия. Для днищ, замкнутых в вершине или закрытых крышкой,  $q_0 = \frac{pr_0}{2}$  и  $t_0 = 0$ , для свободного от нагрузки контура  $t_0 = r_0$ .

Соотношение (4.1.17) называется условием существования оболочки вращения, образованной системой гибких нитей.

При невыполнении этого условия оболочка превращается в механизм, т.е. не воспринимает внешней нагрузки в рамках гипотез нитяной системы.

Выражая слагаемое в правой части уравнения (4.1.17) через функцию Клеро, запишем уравнение профиля образующей днища:

$$\frac{R_2}{R_1} - \frac{2r^2}{r^2 - t_0^2} = \frac{\xi^2}{r^2 - \xi^2} \quad (4.1.18)$$

Используя выражение для тангенса угла геодезического отклонения (4.1.4) и соотношение (4.1.18), запишем разрешающее уравнение траектории намотки относительно функции Клеро:

$$\xi' = \frac{2\sqrt{r^2 - \xi^2} \operatorname{tg} \theta}{r^2 - t_0^2} \quad (4.1.19)$$

Отметим, что в случае  $\operatorname{tg} \theta = 0$  уравнение (4.1.19) превращается в уравнение геодезической траектории.

Задача о нахождении оптимальной траектории намотки и формы равновесного днища решена в работе методами вариационного исчисления. Полная разрешающая система уравнений для определения профиля оптимального днища и оптимальной траектории армирующей нити имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dz^2} &= \frac{\sqrt{r^2 - \xi^2}}{r \sqrt{r^2 - \xi^2}} \frac{2\sqrt{r^2 - \xi^2}}{r^2 - t_0^2}, \\ \frac{d\xi}{dz} &= \frac{2\sqrt{r^2 - \xi^2} k_T}{r^2 - t_0^2}, \end{aligned} \quad (4.1.20)$$

$$\frac{dS_\varphi}{dz} = \frac{R\xi}{r} \sqrt{1 + r'^2},$$

$$\frac{dS}{dz} = \sqrt{1 + r'^2}.$$

Здесь  $S_\varphi, S$  - криволинейные координаты траектории намотки (рис. 4.1.2), используемые для удобства ее практической реализации.

Граничные условия для решения разрешающей системы (4.1.20) выглядят следующим образом:

$$z = 0 \left| \begin{array}{l} r' = 0; r = R; \xi = r_{02} \\ S_\beta = S = 0 \end{array} \right. \quad (4.1.21)$$

Здесь  $R$  - радиус экватора.

Система уравнений (4.1.20) не может быть проинтегрирована в квадратурах, вследствие чего для ее решения используются численные методы.

#### 4.2. Методика расчета прочности и жесткости силовой оболочки корпуса.

Проектные толщины силовой оболочки определяются по формулам, вытекающим из основных теоретических положений предыдущего раздела.

Толщина спиральных слоев на экваторе днища рассчитывается по формуле:

$$h_{СПА} = \frac{p \sqrt{a^2 - r_0^2} + 2q_0 r_0}{2a\bar{\sigma} \cos^2 \varphi_a} \quad (4.2.1)$$

где  $a$  - экваториальный радиус днища;  $p$  - величина внутреннего давления;  $q_0$  - осевое погонное усилие, распределенное по контуру полюсного отверстия;  $r_0$  - радиус полюсного отверстий;  $\bar{\sigma}$  - допускаемое напряжение при растяжении нити;  $\varphi_a$  - угол армирования на экваторе днища.

При закрытом полюсном отверстии принимается  $q_0 = 0.5pr_0$ , при открытом -  $q_0 = 0$ .

Толщина кольцевых слоев на цилиндрической части корпуса рассчитывается по формуле:

$$h_K = \frac{pa \sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \varphi_a}}{2\bar{\sigma}} \quad (4.2.2)$$

Из толщины элементарного монослоя  $h_e$  определяются количества спиральных и кольцевых слоев  $n_{СП}$  и  $n_K$ :

$$n_{СП} = \frac{h_{СПА}}{h_e}, n_K = \frac{h_K}{h_e} \quad (4.2.3)$$

Когда полученные величины  $n_{СП}$  и  $n_K$  не являются целыми, их следует округлить в сторону возрастания. При этом количество спиральных слоев должно быть четным. Определяются фактические толщины спиральных слоев на экваторе днища и кольцевых слоев на цилиндрической части корпуса:

$$h^{\phi}_{СПА} = n_{СП} h_e, h^{\phi}_K = n_K h_e \quad (4.2.4)$$

После завершения проектировочных расчетов должен быть выполнен проверочный расчет напряжений для выбранных фактических толщин.

Напряжение в спиральном слое в произвольной точке меридиана днища определяется по формуле:

$$\sigma_{СП} = \frac{pr}{2h_{СП} \cos^2 \varphi} \quad (4.2.5)$$

где  $h_{СП}$  - толщина спирального слоя в текущем сечении. Как уже отмечалось, эта величина является переменной и определяется из условия непрерывности намотки формулой (4.2.12), так как величина  $nf$  является постоянной для всех сечений, ее можно выразить через толщину оболочки на экваторе, т.е. согласно равенству (4.2.12) имеем:

$$nf = 2\pi ah^\phi_{СПА} \cos \varphi_a \quad (4.2.6)$$

С учетом (4.2.6) формула для определения толщины оболочки в текущем сечении днища может быть записана в виде:

$$h \curvearrowright \equiv h^\phi_{СПА} \frac{a \cos \varphi_a}{r \cos \varphi} \quad (4.2.7)$$

Напряжения в кольцевых слоях материала на цилиндрической части оболочки корпуса определяются по формуле:

$$\sigma_K = \frac{pa - \sigma_{СП} h^\phi_{СПА} \sin^2 \varphi_a}{h^\phi_K} \quad (4.2.8)$$

В рамках жесткостного расчета определяются деформации и перемещения цилиндрической части баллона, деформативность которой существенно превосходит деформативность днищ. Вначале вычисляются жесткости цилиндрической части по формулам:

$$\begin{aligned} B_{11} &= Eh^\phi_{СПА} \cos^4 \varphi_a \\ B_{12} &= Eh^\phi_{СПА} \cos^2 \varphi_a \sin^2 \varphi_a \\ B_{22} &= Eh^\phi_{СПА} \sin^4 \varphi_a + Eh^\phi_K \end{aligned} \quad (4.2.9)$$

Осевая и окружная относительные деформации цилиндрической части  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  определяются по формулам:

$$\varepsilon_1 = pa \frac{0,5B_{22} - B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2} \quad (4.2.10)$$

$$\varepsilon_2 = pa \frac{B_{11} - 0,5B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}$$

Максимальное радиальное перемещение баллона  $w$  и осевое удлинение  $u$  его цилиндрической части длиной  $l$  определяются по формулам:

$$w = \xi_2 a, u = \xi_1 l. \quad (4.2.11)$$

4.3. Обеспечение процесса пропитки перемещающегося наполнителя (жгута, нити) в ванне со связующим. Расчет длины завершения пропитки

При «мокрой» намотке баллона давления жгут перемещается через ванну со связующим, вследствие чего происходит процесс проникновения связующего в межволоконное пространство наполнителя.

Само перемещение, например, жгута марки УКН-5000, имеющего 5000 волокон диаметром от 7 до 9 мкм, существенно ухудшает условия пропитки и зависит от таких технологических параметров как вязкость связующего, его температуры, проницаемости волокнистой структуры и пористости наполнителя (жгута), скорости перемещения.

В идеальном случае пропитка завершается непосредственно в ванне, при этом связующее должно полностью вытеснить воздух из межволоконного пространства, чтобы не нести его в изделие, что приводит в конечном случае к повышенной пористости.

Для достижения требуемой вязкости связующего ( $\sim 0,3$  Па·с) его греют в ванне до 45... 60°C. Однако, при этом длины ванны может не хватить и процесс предполагается интенсифицировать. Это достигается предварительным нагревом жгута непосредственно перед пропиточной ванной. При соприкосновении связующего с горячим волокном оно становится более жидким, быстрее и глубже проникает в межволоконное пространство наполнителя. Кратковременное соприкосновение связующего с горячим

волокном не влияет на весь объем остального связующего в ванне и не вызывает ускорение химической реакции, что могло бы привести к появлению сгусток.

Полученная здесь задача теплопроводности на границе связующее - волокно при сильной нелинейной зависимости скорости пропитки (скорости проникновения связующего в межволоконное пространство) от температуры была решена в работах [75,78]. Для нашей задачи важен основной технологический параметр:  $L_x$  - длина завершения пропитки. Она может быть описана следующей математической моделью:

$$L_x \approx \frac{\varepsilon \mu_0 u}{2\alpha p_0} \left(1 - \frac{T' - T''}{2T_0}\right) L_y^2 \quad (4.3.1)$$

где:  $\alpha$  - проницаемость волокнистой структуры;

$\varepsilon$  - коэффициент пористости наполнителя;

$u$  - скорость перемещения наполнителя в пропиточной ванне;

$T'$  - температура наполнителя;

$T''$  - температура связующего;

$T_0$  - температуростойкость связующего

$p_0$  - эффективный перепад давления (это избыточное давление вязкой жидкости -связующего- в пропиточной ванне над жгутом с учетом капиллярного давления, однако, экспериментально определено, что этот перепад, в данном случае, не превышает 0.1 кПа);

$\mu_0$  - вязкость связующего, Па·с;

$L_y$  - 1/2 условного диаметра жгута, мм

В таблице 4.3.1 представлены физико-механические и технологические свойства углеродных жгутов, применяющихся в технологии изготовления конструкций методом намотки.

Таблица 4.3.1

Свойства углеродных жгутов, применяющихся в технологии изготовления конструкций методом намотки

Марка наполнителя	Вид наполнителя	Физико-механические характеристики волокон									Технологические свойства жгутов			
		$d_{B,}$ мкм	$\sigma_p,$ МПа	$E_p,$ ГПа	$\rho$ $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup>	$\lambda_{II},$ Вт/ мК	$\lambda_I,$ Вт/ мК	$c$ $10^{-6},$ Дж/ кгК	$\alpha'_{II}$ $\cdot 10^{-6},$ 1/К	$\alpha'_I$ $\cdot 10^{-6},$ 1/К	$N_B,$	$d_{ж},$ мм	$\varepsilon$	$d_{ж} \cdot$ $10^{-12},$ м <sup>2</sup>
ВМН-4	Жгут	5-7	1962-2450	196-235	1,7-1,75	22	12,6	0,67	0,8	75	7200	1,2	0,2-0,4	5-8
ВМН-5	Жгут	5-7	2450-2940	245-274	1,76-1,80	102	12,6	0,67	0,8	75	7200	1,2	0,2-0,4	5-8
УКН-5000	Жгут	6-8	2940-3430	186-216	1,7-1,75	22	12,6	0,67	0,8	75	5000	1,0	0,2-0,4	5-8
Торнел	Жгут	6-9	3400-3570	240-270	1,7-1,75	22	12,6	0,67	0,8	75	4900	1,0	0,2-0,4	5-8
Торейка	Жгут	5-8	3450-3700	190-225	1,7-1,80	22	12,6	0,67	0,8	75	4800	1,0	0,2-0,4	5-8

В таблице 4.3.2 представлены свойства эпоксидных смол.

Таблица 4.3.2

## Свойства эпоксидных смол

Показатель	ЭД-24	ЭД-24Н	ЭД-22	ЭД-20	ЭД-16	ЭД-16Р	ЭД-14	ЭД-10	ЭД-8	ЭД-20СП
Массовая доля:										
Эпоксидных групп	23,5	23,5	23,5	22,0	18,0	12-13,5	15,9	13,0	10,0	21,0
Иона хлора, не более	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	-	0,006	0,006	0,006	0,007
Омыляемого хлора, не более	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	-	0,6	0,6	0,6	1,0
Летучих веществ, не более	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	-	0,6	0,6	0,6	0,15
Гидроксильных групп, не более	1,0	0,6	1,0	1,7	2,5	-	-	-	-	-
Динамическая вязкость Па·с:										
При 25°C	8,0	6,5	7-12	12-18	-	1,0	-	-	-	28,0
При 50°C	-	-	-	-	3-20	-	20-40	-	-	-
Время желатинизации с малеиновым ангидридом при 100°C, Ч, не менее	-	-	16	5	3	-	2,5	2,0	2,0	4
Цвет по железокобальтовой шкале, не более	4	4	4	4	6	-	10	6	6	-
Содержание сухого остатка	-	-	-	-	-	73-77	-	-	-	-

На рис. 4.3.1 и рис. 4.3.2 представлены характерные зависимости вязкости эпоксидных смол от температуры. Из представленных данных были выбраны необходимые величины для расчета длины завершения пропитки  $L_x$ :

$$\alpha = 6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 ;$$

$$\varepsilon = 0,3$$

$$u = 0,05 \dots 0,33 \text{ м/с}$$

$$p_0 = 3,0 \text{ кПа}$$

$$\mu_0 = 0,3 \text{ Па·с}$$

$$T'=180...200^{\circ}\text{C}$$

Зависимости длины завершения пропитки  $L_x$  от предварительного нагрева непосредственно перед пропиточной ванной перемещающегося жгута при  $p_0=3\text{кПа}$ , рассчитанные по зависимости 4.3.1, представлены на рис. 4.3.3.

При спиральной и кольцевой намотке баллона в зависимости от кинематики станка и программы намотки скорость перемещения жгута в ванне колеблется от 0 до 0,2 м/с при переходе от днищ к цилиндру. При этом нанос связующего на жгут и пропитка будут неоднородны. Для выравнивания наноса и снятия его излишек на выходе из ванны установлены ножи (технологические скребки), которые так же способствуют улучшению пропитки.

Нанос рассчитывается по формуле:

$$\varphi_n = \frac{t-t_0}{t} 100\% \quad (4.3.2)$$

где:  $t_0$  - линейная плотность жгута до пропитки;

$t$  - линейная плотность жгута после пропитки.

Полученные результаты показали, что при максимальной скорости перемещения жгута  $u = 0,2\text{м/с}$  и  $T'=180^{\circ}$ ,  $L_x = 0,3\text{м}$ , несколько больше длины ванны, однако прохождение жгута через ножи завершает процесс равномерного наноса связующего на жгуте и его пропитку.

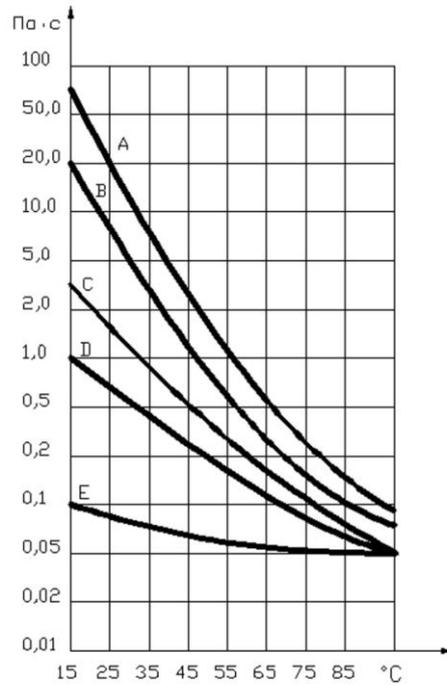


Рис. 4.3.1 Зависимость вязкости от температуры на примере пяти типов эпоксидных смол: А-эпоксидная фенольноформальдегидная смола (n=2,3); В-DGEBA; С-3-4-эпокси-6-метилциклогексилметил 3-4-эпокси-6-метилциклогексилметил-циклогексанкарбоксилат; Д-диглицидиловый эфир линолевой кислоты; Е- диглицидиловый эфир полипропиленгликоля

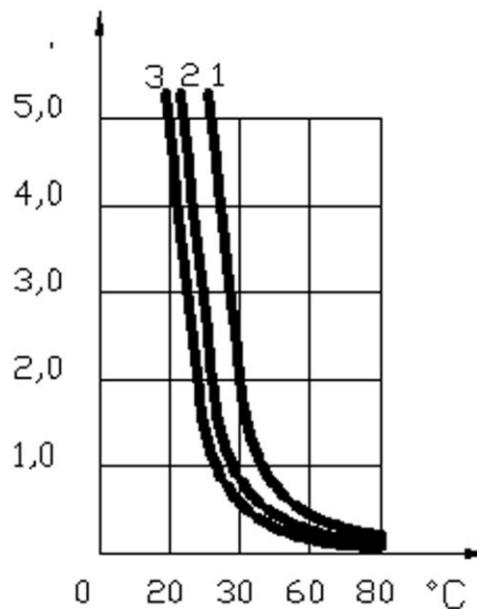


Рис. 4.3.2 Зависимость вязкости эпоксидных связующих от температуры: 1-ЭД-20; 2-ЭД-20+ДЭГ-1 с 15% ТЭАТ; 3-ЭД-20+ДЭГ-1

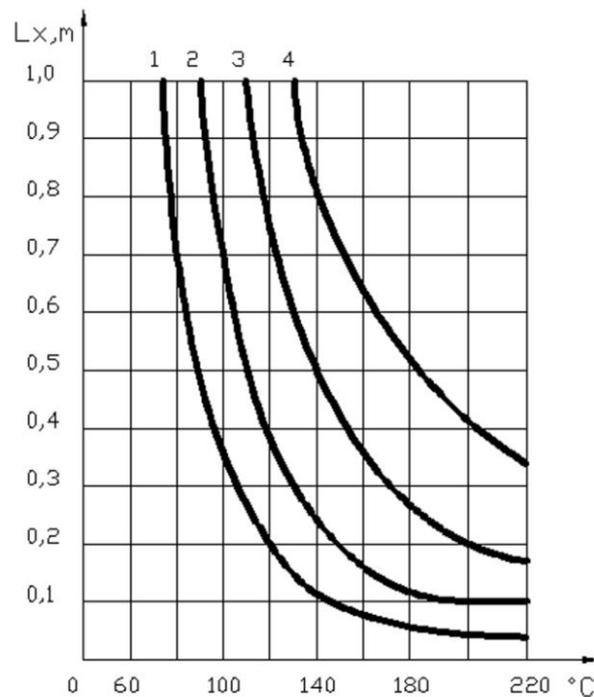


Рис. 4.3.3 Зависимость длины завершения пропитки от температуры нагрева волокна  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$  при  $p_0=3,0\text{кПа}$  и разной скорости  $u$ , полученная по режимам 1-4:

1-  $u=0.05\text{м/с}$ ; 2-  $u=0.1\text{м/с}$ ; 3-  $u=0.2\text{м/с}$ ; 4-  $u=0.33\text{м/с}$

#### 4.4. Расчеты силовой оболочки и циклической прочности баллона БК-7

Проектирование стеклопластиковой оболочки баллона осуществляется по несущей способности (разрывной нагрузке) армирующего жгута. В данном подходе определяющей характеристикой используемого материала является разрывная нагрузка армирующего жгута, получаемая из испытаний пропитанных связующим и отвержденных жгутов РВМПН10-1200-14 (микропластика).

Проектировочный расчет металлокомпозитного баллона давления сводится к определению проектных параметров конструкции, обеспечивающих удовлетворение следующих условий:

– обеспечение минимальной массы проектируемой конструкции. В нашем случае общий вес баллона с лейнером не должен превышать  $5+0,5$  кг.

При этом вес лейнера не более  $3-0,5$  кг, вес стеклопластиковой оболочки не более  $2,3\pm 0,2$  кг.

– сохранение требуемой прочности при действии расчетных нагрузок (давления).

– технологическая реализуемость.

Основными параметрами баллона давления, определяемые в проектировании, являются:

– контуры днищ баллонов (в данном случае форма днищ определяется формой днищ металлического лейнера, являющегося составной частью баллона и используемого в качестве оправки для намотки слоя стеклопластика);

– определение углов армирования (угол намотки спиральных слоев определяется возможностью используемого оборудования (станок WM2.800(рис 4.4.1)), исходя из опыта намотки аналогичных конструкций принимается  $\pm 18^\circ$ );

– определение количества армирующего материала, образующего силовую оболочку (требуемое количество жгутов в спиральных и кольцевых слоях стеклопластиковой оболочки определяется исходя из обеспечения несущей способности баллона и его минимального веса).



Рис. 4.4.1. Станок WM2.800

Исходные данные:

$E = 2,1 \cdot 10^4$  кг/мм<sup>2</sup> – модуль упругости металла в упругой зоне;

$E_c = 0,25 \cdot 10^4$  кг/мм<sup>2</sup> – секущий модуль металла при критической нагрузке;

$E_1 = 1,1 \cdot 10^4$  кг/мм<sup>2</sup> – модуль упругости в микропластике;

$\delta_0 = 2,2$  мм – минимальная толщина металла;

$N = 1200$  ткс – линейная плотность жгута;

$\gamma = 0,00254$  г/мм<sup>3</sup> – плотность волокна;

$R = 75$  мм – внутренний радиус баллона;

$L = 575$  мм – длина цилиндрической части баллона;

$\phi = 18^\circ$  – угол намотки спиральных слоев на цилиндре;

$P = 3$  кгс/мм<sup>2</sup> – расчетное давление в баллоне;

$T = 160$  кг – минимальное разрывное усилие в жгуте микропластика;

$\sigma^B = 118$  кг/мм<sup>2</sup> – предел прочности материала лейнера;

$\sigma^T = 98$  кг/мм<sup>2</sup> – предел текучести материала лейнера.

В результате расчета получено:

$$f = 0,47 \text{ мм}$$

$$B_{11} = 0,567 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}$$

$$B_{12} = 0,060 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}$$

$$B_{22} = 1,557 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}$$

$$B_{11}^* = 1,2786 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}$$

$$B_{12}^* = 0,3824 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}$$

$$B_{22}^* = 2,2686 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}$$

$h_{cn} = 0,63 \text{ мм}$  – толщина наполнителя в спиральных слоях;

$h_k = 1,41 \text{ мм}$  – толщина наполнителя в кольцевых слоях;

$$n_{cn} = 600 \text{ жгутов}$$

$$n_k = 1200 \text{ жгутов}$$

$$\varepsilon_\alpha \cong \varepsilon_\beta \cong 0,029 = 2,9\%$$

$T_1 = 155 \text{ кг}$  – усилие в жгуте при расчетной нагрузке;

$\sigma^0 = 104 \text{ кг/мм}^2$  – напряжение в металле при расчетной нагрузке.

Расчёт на малоцикловую усталость металлокомпозитного баллона давления БК-7 сводится к нахождению следующих параметров:

- допустимой частоты нагружения баллона
- определению остаточной прочности пластиковой оболочки баллона после воздействия циклов
- определению предельного количества циклов для оболочки в зависимости от максимального напряжения циклов.

Исходные данные для расчета циклической прочности:

- число циклов нагружения давлением  $N = 5000$ ;
- предел прочности стеклопластика  $\sigma_B = 1800 \text{ МПа}$ ;
- эксплуатационное внутреннее избыточное давление  $P = 29,4 \text{ МПа}$ ;
- остаточное давление в баллоне  $P = 0,1 \text{ МПа}$ ;

– амплитуда напряжений при циклическом нагружении, полученная в результате расчета баллона при эксплуатационном давлении  $\sigma_a = 692$  МПа.

Следует отметить, что на величину усталостной прочности композита влияет коэффициент асимметрии  $R$  цикла напряжений. В нашем случае имеет место пульсирующий цикл  $R \sim 0$ . Он является наиболее благоприятным для конструкции пластиковой оболочки. Большинство ниже приведенных экспериментальных данных получены при симметричном цикле нагружения образцов, который является наиболее опасным для конструкции и материала.

Частота нагружения оказывает большое влияние на прочность стеклопластиков при циклических нагрузках. От величины частоты зависят, с одной стороны, уровень температуры циклического разогрева как функция внутреннего трения, а с другой - величина циклической ползучести как функция реологических свойств вязкоупругого материала и угловой скорости нагружения. Исследование влияния частоты нагружения стеклопластика на величину предела выносливости  $\sigma_{-1}$  (максимальное напряжение, при котором материал способен сопротивляться, не разрушаясь, при любом произвольно большом числе повторений нагружений) представлено на рис. 4.4.2. Результаты испытаний показывают, что при частоте нагружения 10 Гц предел выносливости снижается на 30%, а при частоте  $10^2$  Гц – на 66%. При частоте  $10^{-2}$  Гц предел выносливости стеклопластика не изменяется, а при  $10^{-1}$  – снижается незначительно.

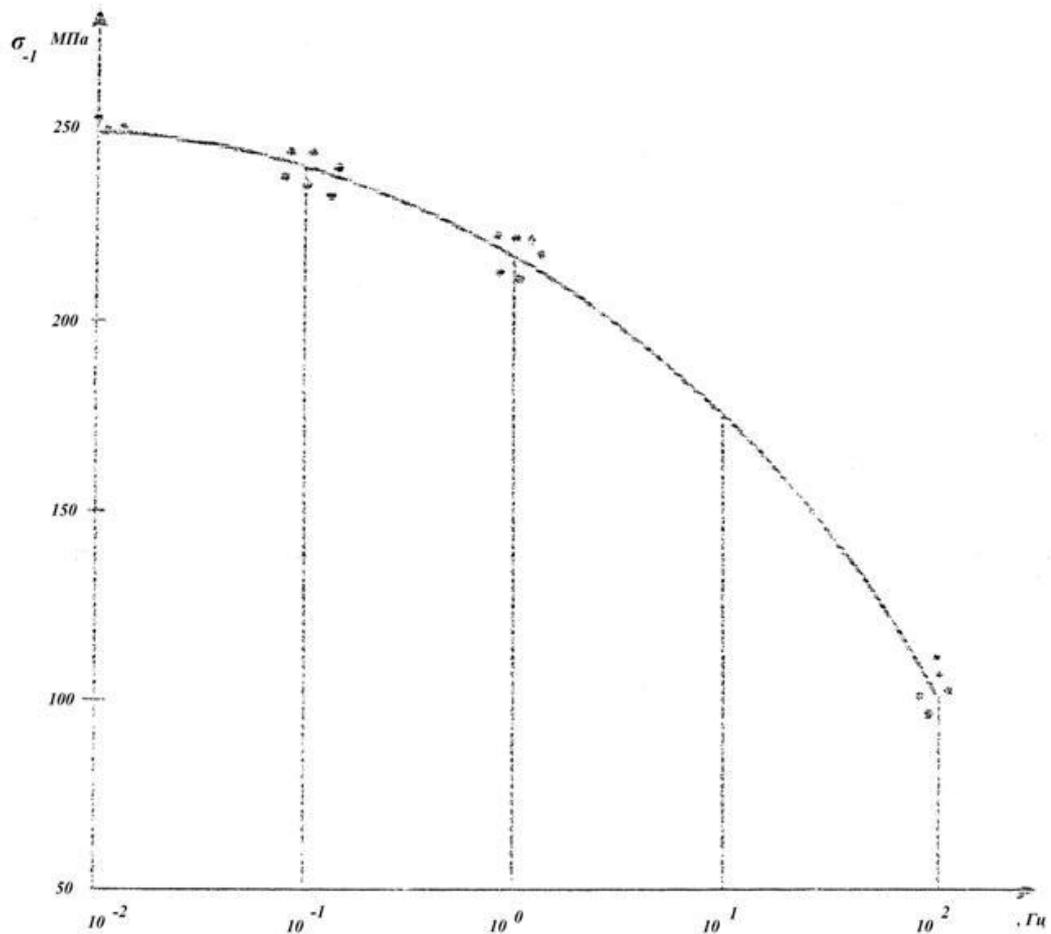


Рис. 4.4.2 Зависимость предела выносливости стеклопластика от частоты нагружения

Определим остаточную прочность. Накопление повреждений в виде микро- и макротрещин при циклическом нагружении может приводить к постепенному снижению исходной прочности материала  $\sigma_B$ . Остаточная прочность  $\sigma_e$  - прочность после наработки некоторого числа циклов нагружений  $N$ . Относительная величина снижения прочности после  $N$  циклов нагружения является прямой оценкой накопленных повреждений в отличие от ее косвенной оценки по температуре разогрева, модулю упругости и др. Величину  $\sigma_e$  необходимо знать и для оценки остаточной работоспособности конструкции баллона после воздействия всех эксплуатационных циклов. В таблице 4.4.1 приведены результаты определения снижения остаточной прочности стеклопластика после предварительного растяжения. При малоцикловом растяжении ( $N = 10^4$ ) с увеличением уровня предварительного нагружения

(величины  $\sigma_A$ ) остаточная прочность уменьшается. Однако, при  $\sigma_A / \sigma_B = 0.3..0.4$  и частоте нагружения  $0,01 \div 0,5$  Гц, что соответствует нашему случаю, снижение прочности незначительное и составляет  $0 \div 5$  %.

Таблица 4.4.1

## Снижение остаточной прочности стеклопластика после растяжения

Материал	$N \cdot 10^5$ циклов	$f$ , Гц	$\sigma_A / \sigma_B$	$(1 - \sigma_{ВЦ}^* / \sigma_B) \times 100\%$
1	2	3	4	5
Стеклопластик СП ЭДУ	10	25	0,65	20
—//—	10	20	0,86	15
—//—	1	1	0,4	10
—//—	0,1	0,5	0,4	5
—//—	0,1	0,01	0,3	0
—//—	0,1	0,01	0,37	0

\*прочность материала после воздействия циклов

Приведем определение предельного количества циклов для стеклопластиковой оболочки в зависимости от максимального напряжения циклов. Малоцикловые испытания проведены с частотой порядка 4 цикла/мин на базе  $N = 10^4$  циклов, а многоцикловые испытания - с частотой 480 циклов/мин (8 Гц) на базе  $N = 10^7$  циклов. Результаты экспериментов удовлетворительно описываются линейными уравнениями в полулогарифмических координатах:

$$\sigma = a + b \cdot \lg N,$$

Параметры  $a$  и  $b$  могут быть определены по методу наименьших квадратов в предположении, что погрешностям подвергались как величины задаваемых напряжений, так и число циклов до разрушения.

По результатам определения параметров  $a$  и  $b$  получена аналитическая зависимость между максимальными напряжениями в цикле и количеством циклов, при котором происходит разрушение стеклопластика:

$$\lg N = 10.448 - 0.0058 \sigma_a.$$

Количество циклов до разрушения стеклопластика в комбинированном баллоне для нашего случая будут:

$$\lg N = 10.448 - 0.0058 \cdot 692 - 6.43, \text{ откуда } N > 10^6.$$

Это более чем на два порядка превышает требования технического задания.

Выше полученные результаты полностью относятся к стеклопластику, применяемому в конструкции комбинированного баллона при заданных характеристиках материала лейнера. Работоспособность самого лейнера при циклических нагрузках подтверждается экспериментально в составе комбинированного баллона.

#### 4.5. Расчеты силовой оболочки и соображения о циклической прочности баллона БК-8

Проектирование силовой оболочки баллона осуществлялось по разрывной нагрузке армирующего жгута, которая получалась из испытаний микропластика из углеродного жгута “Торнел”, и связующего ЭДУ.

Проектировочный расчет металлоуглепластикового баллона давления БК-8 сводился к определению проектных параметров конструкции, обеспечивающих удовлетворение следующих условий:

- обеспечение минимальной массы проектируемой конструкции. В нашем случае общий вес баллона с лейнером не должен превышать 3 кг.

При этом вес лейнера не более 1,0 кг, вес углепластиковой оболочки не более  $1,8 \pm 0,2$  кг.

- сохранение требуемой прочности при действии расчетных нагрузок (давления).

- технологическая реализуемость.

Основными параметрами баллона давления, определяемые в проектировании, являются:

- контуры днищ баллонов (в данном случае форма днищ определяется формой днищ металлического лейнера, являющегося составной

частью баллона и используемого в качестве оправки для намотки слоя стеклопластика);

– определение углов армирования (угол намотки спиральных слоев определяется возможностью используемого оборудования (станок WM2.800 (рис 4.4.1)), исходя из опыта намотки аналогичных конструкций принимается  $\pm 18^\circ$ );

– определение количества армирующего материала, образующего силовую оболочку (требуемое количество жгутов в спиральных и кольцевых слоях стеклопластиковой оболочки определяется исходя из обеспечения несущей способности баллона и его минимального веса).

Исходные данные:

$E = 2,1 \cdot 10^4$  кг/мм<sup>2</sup> – модуль упругости металла в упругой зоне;

$E_c = 0,25 \cdot 10^4$  кг/мм<sup>2</sup> – секущий модуль металла при критической нагрузке;

$E_1 = 1,5 \cdot 10^4$  кг/мм<sup>2</sup> – модуль упругости в микропластике;

$\delta_0 = 1$  мм – минимальная толщина металла;

$N = 1200$  ткс – линейная плотность жгута;

$\gamma = 0,00181$  г/мм<sup>3</sup> – плотность волокна;

$R = 75$  мм – внутренний радиус баллона;

$L = 575$  мм – длина цилиндрической части баллона;

$\phi = 18^\circ$  – угол намотки спиральных слоев на цилиндре;

$P = 3$  кг/мм<sup>2</sup> – расчетное давление в баллоне;

$T = 230$  кг – минимальное разрывное усилие в жгуте микропластика;

$\sigma^B = 118$  кг/мм<sup>2</sup> – предел прочности материала лейнера;

$\sigma^T = 98$  кг/мм<sup>2</sup> – предел текучести материала лейнера.

В результате расчета получено:

$f = 0,66$  мм ;

$B_{11} = 1,1412 \cdot 10^4$  кг/мм ;

$B_{12} = 0,1204 \cdot 10^4$  кг/мм ;

$$B_{22} = 1,4077 \cdot 10^4 \text{ кг/мм} ;$$

$$B_{11}^* = 1,4640 \cdot 10^4 \text{ кг/мм} ;$$

$$B_{12}^* = 0,2172 \cdot 10^4 \text{ кг/мм} ;$$

$$B_{22}^* = 1,7305 \cdot 10^4 \text{ кг/мм} ;$$

$$h_{cn} = 0,93 \text{ мм} - \text{толщина наполнителя в спиральных слоях};$$

$$h_{\kappa} = 1,28 \text{ мм} - \text{толщина наполнителя в кольцевых слоях};$$

$$n_{cn} = 630 \text{ жгутов} ;$$

$$n_{\kappa} = 1018 \text{ жгутов} ;$$

$$\varepsilon_{\alpha} \cong \varepsilon_{\beta} \cong 0,029 = 2,9\% ;$$

$$T_1 = 210 \text{ кг} - \text{усилие в жгуте при расчетной нагрузке};$$

$$\sigma^0 = 104 \text{ кг/мм}^2 - \text{напряжение в металле при расчетной нагрузке.}$$

В таблице 4.5.1 представлены характеристики циклической прочности углепластиков, на основе импортных волокон.

Таблица 4.5.1

## Типичные свойства эпоксидных углепластиков

	Селаниз		Геркулес		Юнион Карбайд	Грейт лейкс карбон		Стакпоулз Файберз
	Селион 6000 (62%)	GY70 470 (62%)	AS (62%)	HMS (62%)	Торнел (65%)	Фортафил3 (60%)	Фортафил5 (60%)	Панекс 30 (60%)
Прочность при растяжении, МПа	1647	783	1880	1137	1560	1309	1102	1550
Прочность при сжатии, МПа	1468	620-703	1791	379	1585	1308	1102	1240
Прочность при изгибе, МПа	1750	792	1791	965	-	1481	1240	1723
Прочность при сдвиге, МПа	125	59	124	55	124	83	76	114
Модуль упругости при растяжении, ГПа	151	289-324	145	207	138	-	-	124

## Продолжение табл. 4.5.1

	Селаниз		Геркулес		Юнион Карбайд	Грейт лейкс карбон		Стакпоулз Файберз
	Селион 6000 (62%)	GY70 470 (62%)	AS (62%)	HMS (62%)	Торнел (65%)	Фортафил3 (60%)	Фортафил5 (60%)	Панекс 30 (60%)
Модуль упругости при сжатии, ГПа	141	308	1381	107	138	-	-	124
Модуль упругости при изгибе, ГПа	135	255	121	169	-	124	162	124
Предельная деформация при растяжении, %	1,1	0,2	1,2	0,55	-	-	-	1,2
Предельная деформация при сжатии, %	1,7	-	-	1,42	-	-	-	-

Учитывая, что углеродные волокна, используемые для намотки силовой оболочки отличаются высокой усталостной стойкостью, то усталостные свойства углепластика определяются природой связующего. Основываясь на этих данных, можно предположить, что циклические испытания для баллона БК-8 будут аналогичны БК-7.

## ГЛАВА V. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЕРХЛЕГКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ ДАВЛЕНИЯ

### 5.1. Типы лейнеров и методика контроля толщины стенки

Из работ [2,3,4,8], что полимерные композиты негерметичны, поэтому конструкции из них в зависимости от уровня исходных требований включают в себя дополнительные герметизирующие слои, оболочки и т.п. В баллонах давления таковыми являются резиновые оболочки, оболочки из термопласта, металлов и т.п. Герметизирующую оболочку, как правило, используют в качестве оправки для намотки слоев силовой оболочки. Герметизирующая оболочка – оправка (лейнер) должна соответствовать требованиям по прочности, обеспечивающим последующую намотку силового слоя композиционного материала (рис 5.1.1). Вес такой оболочки должен быть минимальным, так как согласно теории намотки основные нагрузки при действии внутреннего давления должны нести слои силового слоя. При оптимальном проектировании баллона давления требования минимального веса герметизирующей оболочки при достаточной несущей способности обеспечиваются технологией изготовления и различными инженерными решениями, например заполнением оболочки при намотке водой, сжатым воздухом и т.п.



Рис. 5.1.1 Различные виды лейнеров

Металлические герметизирующие оболочки обеспечивают наивысшую степень герметизации, обладают целым рядом других достоинств и наиболее широко используются при изготовлении баллонов специального назначения. Однако при изготовлении тонкостенных металлических оболочек больших и малых размеров возникают многочисленные трудности с точки зрения технологии изготовления, в частности соединения их отдельных частей. Для этого используют самые прогрессивные методы штамповки, раскатки, сварки, пайки, склеивания, мехобработки. Зачастую на практике пытаются создать металлокомпозитные баллоны, используя для изготовления лейнера технологию производства базового металлического баллона, обеспечивая снижение веса баллона намоткой дополнительных слоев композиционного материала. В этом случае сам лейнер несет определенную часть нагрузки, которая в целом перераспределяется между слоем металла и слоями композиционного материала. При использовании металлического лейнера в

конструкции баллона очень важно учитывать разность в деформации металлического и композиционного слоя, особенно если он изготавливается из отдельных частей и соединяется определенными технологическими способами.

В данное время существует две основные технологии производства корпуса металлических лайнеров: метод изготовления за одно целое с днищем и изготовления корпуса из отдельных частей с помощью сварного соединения.

Цельнотянутый корпус получают вытяжкой. Это операция штамповки, при которой плоская заготовка превращается в полуу деталь замкнутого контура. Для вытяжки применяют прессы двойного действия, которые имеют два ползуна — наружный и внутренний.

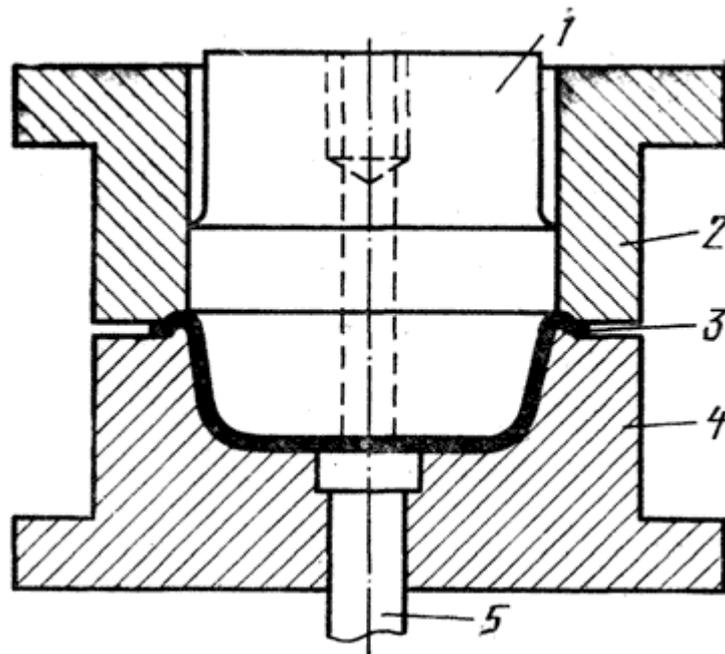


Рис. 5.1.2 Вытяжной штамп

Процесс вытяжки пояснен на рис. 5.1.2. Плоская заготовка помещается на поверхность матрицы 4, после чего она прижимается кольцом 2. Вытяжку производит пуансон, который постепенно углубляется в полость матрицы и образует замкнутую полуу деталь 3. После подъема пуансона и прижимного кольца деталь выталкивается из матрицы под действием толкателя 5. Усилие прижима строго регламентируют, так как при недостаточном усилии происходят проскальзывание заготовки и образование на детали складок. При слишком большом усилии прижима последний не дает заготовке увлекаться

пуансоном в матрицу и происходит разрыв заготовки. Различают неглубокую вытяжку, когда отношение диаметра детали или ее характерного размера к высоте  $H$  не превышает 0,5, и глубокую вытяжку, тогда  $d/h \geq 0.5$

Вытяжкой легче всего изготавливаются полые цилиндрические и полусферические детали.

Число операций вытяжки зависит от отношения высоты детали к ее поперечному размеру. При вытяжке глубоких деталей предварительно вытягивают промежуточную деталь, имеющую меньшую высоту и больший диаметр, чем у окончательной детали. Затем операцию вытяжки повторяют несколько раз, пока не будет получена окончательная деталь.

Процесс вытяжки протекает при высоких давлениях обрабатываемого материала и характеризуется явлением «сползания» штампуемого материала с поверхности матрицы, что вызывает интенсивный износ матрицы, пуансона и прижима. В некоторых случаях при штамповке деталей из мягких материалов происходит налипание металла заготовки на поверхность рабочих частей штампа, в связи с чем появляются на них риски и задиры, приводящие со временем к разрыву штампуемых деталей.

Для уменьшения трения между заготовкой и рабочими частями штампов применяют специальные смазочные составы, которые создают на поверхности металла равномерную не засыхающую пленку, облегчающую процесс вытяжки и уменьшающую износ рабочих частей штампов.

При вытяжке деталей вследствие наклепа происходит их упрочнение, вследствие чего увеличивается сопротивление деформированию и снижению пластичности. При вытяжке деталей за несколько операций может произойти значительное снижение пластичности, что приводит к разрушению деталей.

Отмечено, что пластичность металла со временем ухудшается, поэтому стремятся как можно быстрее передавать заготовки с операции на операцию, не допуская их старения. Для восстановления пластических свойств металла применяют отжиг.

После получения цельнотянутого корпуса его обрабатывают на станках токарной группы до получения заданных технологических и конструкторских требований, как показано на рис. 5.1.3.

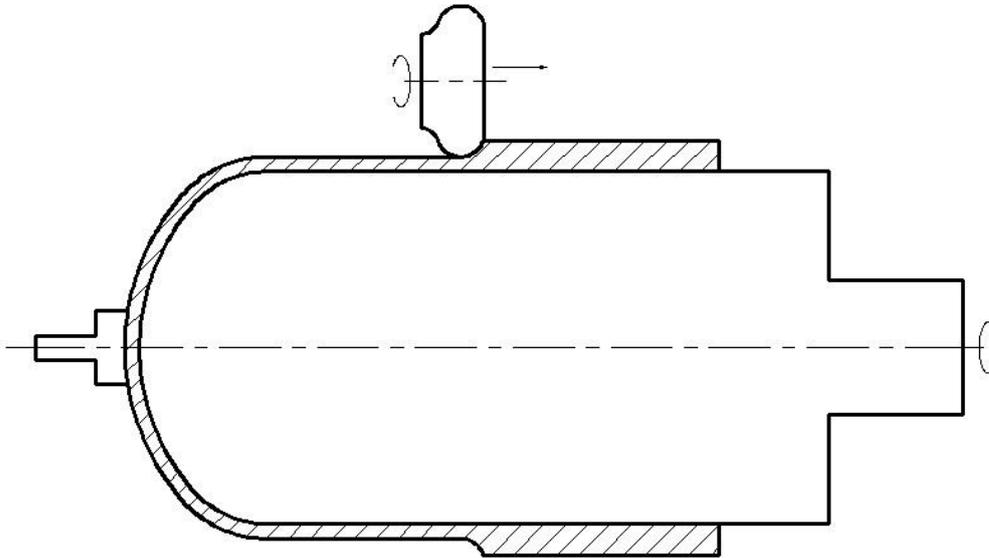


Рис. 5.1.3 Окончательная обработка на токарном станке

Технология производства лейнеров сварным методом заключается в производстве листового проката из которого вырезается или вырубается заготовка для составных частей лейнера, затем производится штамповка всех частей лейнера с последующей механической обработкой. После получения отдельных частей, их сваривают всеми видами промышленной сварки.

При необходимости после сварки производят термообработку, затем испытания сварных соединений и контроль.

Сварку лейнеров следует проводить в соответствии с требованиями технических условий на изготовление или технологической документации.

Технологическая документация должна содержать указания по:

- технологии сварки материалов, принятой для изготовления сосудов (сборочных единиц, деталей);
- применению присадочных материалов;

- видам и объему контроля;
- предварительному и сопутствующему подогреву;
- термической обработке.

Все сварочные работы следует проводить при положительных температурах в закрытых отапливаемых помещениях.

Форма подготовки кромок должна соответствовать требованиям технической документации или проекта. Кромки подготовленных под сварку элементов сосудов должны быть зачищены на ширину не менее 20мм, а для электрошлаковой сварки - на ширину не менее 50мм. Кромки не должны иметь следов ржавчины, окалины, масла и прочих загрязнений. Кромки должны проходить визуальный осмотр для выявления пороков металла. Не допускаются расслоения, закаты, трещины, а для двухслойной стали - также и отслоения коррозионно-стойкого слоя.

Все сварные швы подлежат клеймению, позволяющему установить сварщика, выполнявшего эти швы. Клеймо наносят на расстоянии 20-50мм от кромки сварного шва с наружной стороны. Если шов с наружной и внутренней сторон заваривается разными сварщиками, клейма ставят только с наружной стороны через дробь: в числителе клеймо сварщика с наружной стороны шва, в знаменателе клеймо сварщика – с внутренней стороны. Если сварные соединения сосуда выполнены одним сварщиком, то допускается клеймо ставить около таблички или на другом открытом участке.

У продольных швов клеймо должно быть расположено в начале и в конце шва на расстоянии 100мм от кольцевого шва. На обечайке с продольным швом длиной менее 400мм допускается ставить одно клеймо. На кольцевой шов допускается ставить одно клеймо. Место клеймения заключается в хорошо видимую рамку, выполняемую несмываемой краской. Но, учитывая, что толщина стенки менее 4мм вместо клеймения сварных швов допускается прилагать к паспорту сосуда схему расположения сварных швов с указанием фамилий сварщиков и их подписью.

Типовая технология изготовления представлена на рис. 5.1.4.



Рис. 5.1.4 Типовая технология изготовления лайнера

## 5.2. Разработка типовой технологии изготовления металлокомпозитных баллонов давления типа БК-7 и БК-8

Высокая технологичность разрабатываемой конструкции в первую очередь обеспечивается совмещением функции герметизирующей оболочки (лейнера) и оправки для намотки баллона. Лейнер для БК-7 и БК-8 изготовлены из металла, с минимальной толщиной стенки (0,2...1мм.) Принципиальным является выбор материала лайнера (алюминий, титан, сталь). С точки зрения технологичности при изготовлении и высоких усталостных характеристиках и прочности баллона, предпочтительными являются тонкостенные оболочки из нержавеющей стали.

Основными параметрами баллона давления, определёнными в проектировании являются:

1. контуры днищ баллонов (в случае переделки цельнометаллического баллона в металлокомпозитный форма днищ определяется формой днищ

металлического баллона, в случае использования оптимального тонкостенного лайнера форма днищ специально рассчитывается).

2. определение углов армирования (углы намотки спиральных слоёв определяются возможностью используемого оборудования, исходя из опыта намотки аналогичных конструкций).

3. количество слоёв армирующего материала, образующих силовую оболочку.

В силовой оболочке металлокомпозитного баллона нагрузка, возникающая от действия внутреннего давления, воспринимается системой нитей, образующих оболочку, и направлена вдоль их расположения. В связи с этим, как показали проведённые исследования, данные по характеристикам, включая длительную и усталостную прочность, полученные на однонаправленных образцах полностью соответствуют характеристикам, реализуемым в конструкции силовой оболочки.

Чертеж баллона представлен на рис. 5.2.1.



Рис. 5.2.1 Комбинированный баллон давления

### 5.3. Описание технологии изготовления комбинированных баллонов давления БК-7 и БК-8

Разработка технологии производства баллонов и их реализация осуществлялась на производственной базе предприятия ОАО «Композит». Технологический процесс однотипных баллонов БК-7 и БК-8, конструктивно отличающиеся разными материалами силовой оболочки – стеклопластиком и углепластиком, а также толщиной лейнера – 2.0 и 0.5мм соответственно, имеют один метод изготовления – спирально-кольцевую «мокрую» намотку. Лейнер выполняет одновременно роль конструктивного внутреннего герметизирующего элемента и оправки для намотки изделия, изготавливается отдельно. Поэтому технологический процесс для баллонов данного типоразмера является типовым и состоит из следующих основных операций:

1. Комплектация основных материалов.
2. Входной контроль основных материалов
3. Подготовка намоточного станка WM2.800.
4. Приготовление связующего.
5. Намотка силовой оболочки.
6. Отверждение силовой оболочки.
7. Выходной контроль по параметру G - масса изделия (кг).

#### 1. Комплектация основных материалов.

##### 1.1. Армирующими материалами для баллонов были выбраны:

- баллон БК-7 : стеклоровинг РВМН 19-1480-80 ТУ 5952-146-05786904-98,

-баллон БК-8 : углеродный жгут разработки японской фирмы «Торейка» Т-700.

##### 1.2. Полимерное связующее ЭДУ:

- смола эпоксидная диановая ЭД-22 ГОСТ 10587-84,

- смола алифатическая эпоксидная ДЭГ-1 (ускоритель) ТУ 2225-390-0487-2688-98,

- отвердитель Алкофен- МА ТУ 6-22-362-95.

## 2. Входной контроль основных материалов

Основные материалы, поступающие от заводов поставщиков, имели паспорта (сертификаты) на изготовление с указанием в них технических требований, дату изготовления, условия и срок хранения.

## 3. Подготовка намоточного станка WM2.800 к работе.

3.1. Собирают нитетракт.

3.3. Заправляют 4 бобины с намоточным материалом, регулируют натяжение  $P=2-4$  кгс на ленту.

3.4. Устанавливают и закрепляют лейнер. Предварительно проводят наддув лейнера избыточным давлением  $2,0$  кгс/см<sup>2</sup>.

3.5. Проверяют биметаллический нагреватель, включением его на 10 мин.

3.6. Подключают компьютер к системе управления намоточного станка WM 2.800.

3.7. Опробуют программу намотки на одном жгуте, намотав один кольцевой и один спиральный слой.

3.8. Непосредственно перед намоткой изделия протирают элементы нитетракта ацетоном.

4. Приготовление связующего ЭДУ и заливка его в пропиточную ванну намоточного станка WM 2.800.

4.1. В смеситель емкостью 10 литров заливают эпоксидную смолу ЭД-22, предварительно разогретую в печи до  $50^{\circ}\text{C}$ , в количестве 6 кг.

4.2. В смеситель добавляют ускоритель ДЭГ-1 и отвердитель Алкофен-МА.

4.3. Производят перемешивание компонентов связующего лопастной мешалкой со скоростью 120 об/мин в течение 20 мин.

4.4. Определяют вязкость связующего вискозиметром ВЗ-4 (выходное сопло 4мм). Требуемая вязкость 20 – 22 сек.

5. Намотка силовой оболочки комбинированного баллона на намоточном станке WM 2.800.

5.1. Переливают примерно 2 литра связующего из смесителя в технологическую емкость для доставки к намоточному станку и заливки его в пропиточную ванну станка.

5.2. Включают автоматический обогрев пропиточной ванны намоточного станка, обеспечив температуру связующего  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

5.3. Поверхность лейнера обезжиривают растворителем «нефрас» (бензин «Галоша»).

5.4. Ленту армирующего материала (для баллона БК-7 – стеклоровинг РВМН 19 -1480-80; для баллона БК-8 – углеродный жгут Т -700), состоящую из 4-х жгутов, закрепляют на головке приводного шпинделя левой консоли.

5.5. Контролируют натяжение ленты армирующего материала со связующим. Требуемое натяжение 4-6 кгс на ленту.

5.6. Кнопкой «Старт программы» на панели управления производят намотку 2-х слоев спиральной намотки и одного однослойного и 2-х двухслойных промежуточных согласно схеме армирования (таблица 5.3.1).

5.7. Доводят внутреннее давление в лейнере до 3-х кг/см<sup>2</sup>, не снимая его со станка (для баллона БК-8).

5.8. Завершают намотку 3-го слоя спирального и двух кольцевых.

5.9. После окончания намотки обрезают ленту армирующего материала, поверхность баллона выключают и изделие снимают со станка.

Технологические параметры намотки силовой оболочки представлены в таблице 5.3.1.

Таблица 5.3.1

## Технологические параметры намотки силовой оболочки

Наименование параметра	Значение параметра	
	Спиральный слой	Кольцевой слой
Число жгутов в ленте	4	
Ширина ленты, (мм)	8	8
Длина слоя, (мм)	-	-
Шаг намотки	-	-
Угол намотки, град	18	30
Число проходов в одном слое (шт)	66±2	60
Натяжение ленты (кг)(для БК-7/БК-8)	<10/ <5	
Зазоры между жгутами и лентами (мм)	<1	<1
Температура переработки связующего (°С)	25±5	
Количество жгутов (для БК-7/БК-8)	600/630	1200/1018

6. Отверждение силовой оболочки комбинированного баллона, намотанного на станке WM 2.800.

6.1. Намотанный баллон помещают в термокамеру, предварительно нагретую до 50°С.

6.2. Отверждение связующего проводят по следующему режиму:

- нагрев до 60°С, выдержка 2 часа;
- подъем температуры до 100°С, выдержка 2 часа;
- подъем температуры до 120°С, выдержка 4 часа;
- охлаждение вместе с печью до температуры 30-40°С

7. Выходной контроль по параметру G – масса изделия (кг).

7.1. Проводят взвешивание изделия. Результаты взвешивания представлены в таблице 5.3.2.

Таблица 5.3.2

## Результаты взвешивания изделия

№ баллона	№ партии	Масса баллона, кг
1	1-10	5,934
2	1-10	6,024
3	1-10	6.125
4	1-10	6, 217
5	1-10	5,996

Продолжение табл. 5.3.2

№ баллона	№ партии	Масса баллона, кг
6	2-10	6,030
7	2-10	6,221
8	2-10	6,115
9	2-10	6,123
10	2-10	5,867
11	3-11	6,102
12	3-11	6,000
13	3-11	6,203
14	3-11	5,908
15	3-11	6,034
16	4-11	6,028
17	4-11	6,000
18	4-11	6,100
19	4-11	6,143
20	4-11	6,159
21	5-12	6,004
22	5-12	6,012
23	5-12	6,100
24	5-12	6,110
25	5-12	6,095
26	6-12	5,999
27	6-12	6,045
28	6-12	6,065
29	6-12	6,040

#### 5.4. Изготовление и испытание металлокомпозитного баллона БК-7.

В течение ряда лет предприятием изготавливались и испытывались металлокомпозитные баллоны со стеклопластиковой силовой оболочкой. Намотка и отверждение баллона осуществлялись под постоянным инженерным контролем. В процессе намотки проводился постоянный контроль натяжения жгутов, вязкости связующего и его температуры в пропиточной ванне. Постоянно контролировалось количество жгутов в спиральных и кольцевых слоях.

Схема намотки баллонов осуществлялась в соответствии с принятыми

решениями:

- количество жгутов в спиральных слоях – таблица 5.4.1;
- количество жгутов в кольцевых слоях - 1200.

Чередование слоев: один спиральный слой, два кольцевых слоя, один спиральный слой, два кольцевых слоя, один спиральный слой. Результаты испытаний приведены в таблице 5.4.1. Характер разрушения – рис. 5.4.2.

Таблица 5.4.1

## Результаты испытаний баллонов БК-7

№ баллона	Лейнер, вес кг	Число слоев	Количество жгутов	Давление разрушения
1	термообработанный P=2,970 кг	3 спир. сл. 4 кольц. сл.	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	600 атм
2	—//— P-2,960 кг	—//—	Спир. сл.- 780 Кольц. сл.- 1200	680атм
3	термообработанный (без мех. обработки) P=3,460 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	820 атм
4	нормализованный P=2,990 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	610 атм
5	Нормализованный, 2,863 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	781 атм
6	3,260 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	807 атм
7	3,093 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	794 атм
8	2,940 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	786 атм
9	3,425 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	818 атм
10	3,333 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	812 атм
11	3,135 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	799 атм
12	3,015 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	791 атм
13	2,880 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	782 атм
14	3,227 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	805 атм
15	3,450 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	820 атм
16	2,970 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	788 атм

Продолжение табл. 5.4.1

№ баллона	Лейнер, вес кг	Число слоев	Количество жгутов	Давление разрушения
17	3,200 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	803 атм
18	3,393 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	816 атм
19	3,167 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	801 атм
20	3,440 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	819 атм
21	3,063 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	794 атм
22	2,990 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	789 атм
23	3,287 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	809 атм
24	2,910 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	784 атм
25	3,365 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	814 атм
26	3,213 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	804 атм
27	3,105 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	797 атм
28	3,045 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	793 атм
29	3,410 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	817 атм
30	3,300 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	810 атм
31	3,075 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	795 атм
32	3,003 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	790 атм
33	3,377 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	815 атм
34	3,350 кг	—//—	Спир. сл.- 690 Кольц. сл.- 1200	813 атм

Описание результатов испытаний.

Баллоны разрушились примерно в одной части окружности (рис. 5.4.2). Начало разрушения в зоне перехода цилиндра в сферу. Разрушение локальное. Нарушения целостности пластика, кроме места разрушения, включая и зону

перехода сферы в цилиндр, не были. Толщина лейнера в местах локальных разрушений колеблется от 0,6 мм до 2,6 мм.

Дополнительно был изготовлен и испытан, баллон с лейнером, изготовленным по согласованной технологии (без механической обработки). Разрушение баллона произошло при  $P=820$  кгс/см<sup>2</sup> по цилиндру на расстоянии 110 мм от перехода цилиндра в сферу из-за разрушения лейнера. Пластик не исчерпал своей несущей способности.

Анализ результатов испытаний позволяет сделать следующие выводы:

– при абсолютно стабильных параметрах намотки и физико-механических характеристиках наполнителя разрушение баллонов происходит в месте перехода цилиндра в сферу примерно в одном и том же месте (по радиусу, по углу).

– разрушение начиналось с лейнера с последующей потерей герметичности баллона и, как следствие, локальное разрушение оболочки в месте вскрытия лейнера.

– увеличение количества жгутов в осевом направлении не сказалось на характере разрушения.

– причиной локального разрушения баллонов является потеря несущей способности лейнера, связанная с изменением технологии его изготовления (введение операции его механической обработки с целью доведения веса до 3 кг).

– разрушение баллона с лейнером, изготовленным по согласованной технологии (без механической обработки) произошло при  $P=820$  кгс/см<sup>2</sup> по цилиндру на расстоянии 110 мм от перехода цилиндра в сферу из-за разрушения лейнера. Пластик не исчерпал своей несущей способности.



Рис. 5.4.1. Баллон БК-7 до испытаний на разрушение



Рис. 5.4.2. Баллон БК-7 после испытаний на разрушение

### 5.5. Изготовление и испытание металлокомпозитного баллона БК-8

На предприятии ОАО “Композит” были изготовлены и испытаны опытные образцы металлокомпозитных баллонов с углепластиковой силовой оболочкой. Программа намотки была разработана и смоделирована в соответствии с формулами разделов 2 и 3. В процессе намотки проводился постоянный контроль натяжения жгутов, вязкости связующего и его температуры в пропиточной ванне. Постоянно контролировалось количество жгутов в спиральных и кольцевых слоях. Применялись углеродные жгуты марки “Торнел Т700” с линейной плотностью 800 текс.

Схема намотки баллонов осуществлялась в соответствии с принятыми решениями:

- количество жгутов в спиральных слоях - 630
- количество жгутов в кольцевых слоях – 1018

Чередование слоев: один спиральный слой, два кольцевых слоя, один спиральный слой, два кольцевых слоя, один спиральный слой. Результаты испытаний приведены в таблице 5.5.1. Характер разрушения - на рисунках.

Таблица 5.5.1

Исходные данные и результаты испытаний баллонов БК-8

№ баллона	Лейнер, вес, кг	Число слоев	Давление разрушения
1	1,455 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	783 атм
2	1,485 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	789 атм
3	1,437 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	791 атм
4	1,494 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	808 атм
5	1,517 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	815 атм
6	1,454 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	796 атм
7	1,404 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	781 атм
8	1,544 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	823 атм

Продолжение табл. 5.5.1

№ баллона	Лейнер, вес, кг	Число слоев	Давление разрушения
9	1,501 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	810 атм
10	1,464 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	799 атм
11	1,417 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	785 атм
12	1,420 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	786 атм
13	1,550 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	825 атм
14	1,477 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	803 атм
15	1,461 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	798 атм
16	1,407 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	782 атм
17	1,534 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	820 атм
18	1,497 кг	3 спир.сл, 4 кольц. сл.	809 атм

#### Описание результатов испытаний.

Баллоны разрушились в цилиндрической части, непосредственно примыкающей к днищу. Характерное разрушение предоставлено на фото. Разрушение локальное. Толщина лейнера в местах локальных разрушений колеблется от 0,3 мм до 0,5 мм.

Анализ результатов испытаний позволяет сделать следующие выводы:

- при абсолютно стабильных параметрах намотки и физико-механических характеристиках наполнителя разрушение баллонов происходило в цилиндрической части, непосредственно примыкающей к днищу. (по радиусу, по углу).

- разрушение начиналось с лейнера с последующей потерей герметичности баллона и, как следствие, локальное разрушение оболочки в месте вскрытия лейнера.

- причиной локального разрушения баллонов является потеря несущей способности лейнера.

На рис. 5.5.1 - 5.5.2 представлены баллоны до и после испытаний на разрушение



Рис. 5.5.1. Баллон БК-8 до испытаний на разрушение



Рис. 5.5.2. Баллон БК-8 после испытаний на разрушение

5.6. Исследования микроструктурных и технологических параметров изготовления материалов стеклопластиковой и углепластиковой силовых оболочек баллонов БК-7 и БК-8

Для оценки физико-механических характеристик комбинированных баллонов необходимо было провести исследования микроструктурных параметров материалов силовых оболочек: стеклопластика и углепластика. Хотя кольцевые слои являются однонаправленными, а спиральные – близкие к ним, однако по толщине стенки получается регулярная комбинация этих слоев со сложной микроструктурой. Микроструктура определялась на образцах, вырезанных из стенки изделия размером 40x40мм с изготовлением шлифов. На рис. 5.6.1. показан конструкционный элемент комбинированного баллона: части лайнера и силовой оболочки, из которой вырезались образцы для микроструктурных исследований.



Рис. 5.6.1 Конструктивный элемент, вырезанный из стенки комбинированного (металл-стеклопластик) баллона высокого давления  $P_{раб}=29,4$  МПа, вес 6,0кг

Исследовалась величина пористости в силовой стенке, объемное содержание волокон, матрицы и пор в зависимости от технологических параметров изготовления: содержания связующего в пропитанном жгуте, содержания матрицы в силовой стенке, а также содержание связующего в пропитанном жгуте непосредственно перед укладкой на оправку.

На рис. 5.6.2. представлена зависимость содержания связующего в стекложгуте РВМН10-1200-78 и углеродном Т-700 в зависимости от натяжения при намотке.

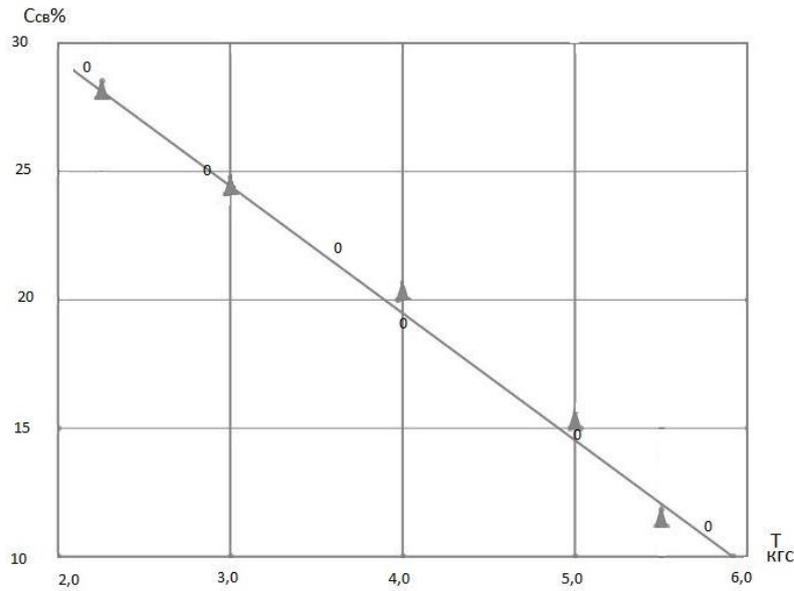


Рис. 5.6.2 Зависимость содержания связующего в стеклянном и углеродном жгутах от натяжения  $T$  при намотке:  $\Delta$ -углеродный жгут,  $\emptyset$ -стеклянный жгут

На рис. 5.6.3 представлена зависимость содержания матричного материала (отверждённого связующего) в стенке силовой оболочки и пористости в ней от содержания связующего в пропитанном жгуте непосредственно перед укладкой на оправку при намотке изделия.

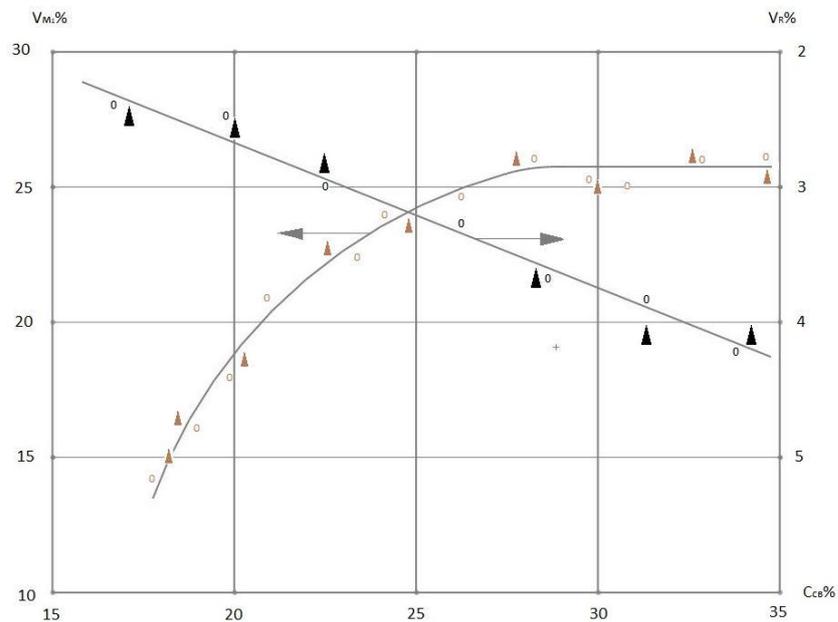


Рис 5.6.3 Зависимость содержания матричного материала  $V_m$  (отвержденного связующего) и объемного содержания пор ( $V_r$ ) в стенке силовой оболочки от содержания связующего в пропитанном жгуте,  $\Delta$ -углеродный жгут,  $\emptyset$ -стеклянный жгут

Как для стеклянного, так и для углеродного жгутов зависимость удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией. Жгуты (как стеклянный, так и углеродный) должны содержать от 15 до 22% (объемных) связующего непосредственно перед укладкой на оправку в процессе намотки. При этом натяжение не должно превышать 4,5 кгс на жгут для данного изделия.

Микроструктурные исследования показали, что пористость в силовой стенке зависит от содержания связующего в пропитанном жгуте в диапазоне 15...25% и изменяется не существенно (от 5 до 3,2%). Однако при содержании связующего ниже 15% в жгуте пористость начинает резко расти, на что пришлось обратить внимание.

На рис. 5.6.4 представлена зависимость содержания волокна ( $V_v$ , %) и пор ( $V_p$ , %) в стенке изделия от объемного содержания связующего ( $V_{св}$ , %) в пропитанном жгуте.

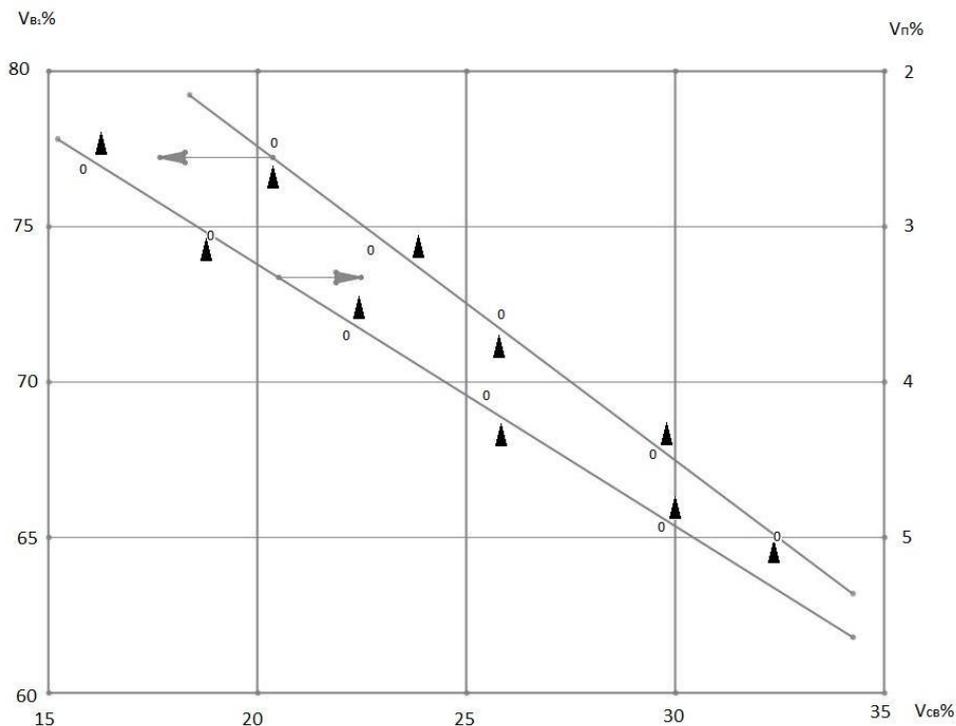


Рис. 5.6.4 Зависимость объемного содержания волокна ( $V_v$ , %) и пор ( $V_p$ , %) в стенке изделия от объемного содержания связующего ( $V_{св}$ , %) в пропитанном жгуте, Δ-углеродный жгут, ○-стеклянный жгут

Так как текстильные формы обеих жгутов идентичны (диаметр волокон 6...9мкм, плотность жгутов 700...1200 текс), то и микроструктурные параметры близки, а содержание волокон в объеме матрицы и величина пористости непосредственно зависят от технологических параметров изготовления.

Параллельно проводилось определение содержания связующего (матрицы) в образцах, вырезанных из силовых оболочек баллонов. Результаты подтверждают значения, полученные в микроструктурном анализе для диапазона  $C_{св}=20...25\%$  (рис. 5.5.2.). Были определены плотности стеклопластика и углепластика в образцах, вырезанных из силовых стенок опытных образцов баллонов методом гидростатического: стеклопластик – 1850...2200 кг/м<sup>3</sup>; углепластик – 1450...1500кг/м<sup>3</sup>.

Исследования микроструктурных и технологических параметров показали, что жесткое соблюдение технологии изготовления комбинированных баллонов позволяет получать изделия с высокими и стабильными физико-механическими характеристиками.

### 5.7. Сравнительный анализ полученных результатов

При проектировании силовой оболочки комбинированного баллона не было необходимости применять феноменологический подход, основанный на расчетно-экспериментальных методах, к определению упругих постоянных и прочности материала силовой оболочки.

Использовался микроструктурный анализ образцов, вырезанных из силовой стенки баллона, что, собственно, позволило оценить совершенство стеклопластиков и углепластиков в части равномерности распределения волокон и содержания компонентов: матрицы, армирующих волокон и наличие пор.

Результаты механических испытаний опытных образцов баллонов БК-8 показали, что использование тонкостенных лейнеров (до 0,5мм) и углеродных

жгутов (типа Торнел Т-700) позволяют получить сверхлегкий баллон весом до 3,0 кг с теми же прочностными характеристиками, как и у баллона БК-7:  $R_{раб}=29,4$  МПа,  $R_{разр.}= 76,4$  МПа.

Технология изготовления сравниваемых баллонов является типовой и отличается используемыми армирующими материалами, но при этом применяется одно и то же эпоксидное связующее – ЭДУ (может применяться любое аналогичное).

При разработке технологии изготовления сверхлегкого баллона необходимо учитывать более жесткое соблюдение технологических параметров изготовления, например, натяжение наматываемой ленты не должно превышать 4.5 кг/жгут для данного вида изделия, содержание связующего при укладке его на оправку должно быть в диапазоне 15...22%, а программа намотки должна учитывать толщину уложенных слоев при намотке текущего слоя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен подробный анализ и обобщены существующие конструктивные схемы и технологические процессы непрерывной намотки баллонов давления из полимерных композиционных материалов, приведены варианты оборудования для намотки, что позволило выбрать конструктивную схему сверхлегкого баллона - как комбинированного с металлическим лейнером и композитной силовой оболочкой, и наметить пути решения задачи по созданию серийного производства.

2. Разработана методика по созданию программ непрерывной намотки (программируемой укладки бесконечного наполнителя) сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов давления. Исследованы определяющие технологические параметры намотки нитью, позволяющие разработать алгоритм расчета движения исполнительных органов намоточного станка. Для расчета траектории намотки принят программный комплекс CADWIN, удобный для технологов как пользователей интерфейса.

3. Разработана инженерная методика проектирования и расчета силовой оболочки корпуса баллона на прочность и жесткость.

4. Разработаны комплекс конструктивно-технологических решений и технологические процессы производства сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов давления.

5. Проведенные мероприятия по созданию технологии и отработке конструкции позволили внедрить в серийное производство два типа сверхлегких герметичных баллона высокого давления БК-7 и БК-8 весом 5,5кг и 3,0кг соответственно.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология производства ракетных двигателей твердого топлива: учебное пособие / В.А. Калинин, Д.А. Ягодников.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 68 с.
2. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы: Научное издание. - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. - 352 с.
3. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд.- Спб.: Научные основы технологии, 2010. - 822 с.
4. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / М.Л.Кербер, В.М. Виноградов, Г.С.Головкин и др.; под ред. А.А.Берлина.- Спб.: Профессия. 2008. – 560с.
5. Воробей В.В., Мороз Н.Г., Технология непрерывной намотки нитью. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 180с.: ил.
6. Мелешко А.И., Половников Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты.- М.: «САЙНС-ПРЕСС», 2007. - 192 с.
7. Ziegmann G., 2007, №4, S. 16 — 115.
8. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учебное пособие. - Университетская книга; Логос, 2006.- 400 с.
9. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. - Спб.: Профессия, 2006. – 624с.
- 10.Павловский Д.В. Использование базальтовых волокон при изготовлении баллонов для сжатого газа. Научно - популярный журнал «Композитный мир» Издательский дом «Композитный мир», Спб, №06, 2006.
- 11.Тарасов В.А., Кашуба Л.А. Теоретические основы технологии ракетостроения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
- 12.Lightweight ballistic composites. Militari and law-enforcement application. / Ed.A.Bhatnagar. Woodhead Publishing and Maney Pablishing, Cambridge

- England, 2006/4.
- 13.Машиностроение. Энциклопедия в 40т. Неметаллические конструкционные материалы. Т.П-4 / Ю.В.Антипов, Б.Г.Бабаевский, Ф.Я.Бородай и др.; Под ред. А.А. Кулькова. - М.: Машиностроение, 2005. – 464с.
  - 14.Тайманов И.А. Лекции по дифференциальной геометрии. Т. II. Риманова геометрии. — Новосибирск: НГУ, 2005.
  - 15.Ярославцев В.М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов/ Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Спец. выпуск; Композиционные материалы, конструкции и технологии. (Сер. Машиностроение). М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005.
  - 16.Иванов А.А., Семенов В.И. Проектирование и производство изделий из полимерных композиционных материалов: в 2-х книгах. КН.2.Производство изделий / Под ред. В.И.Семенова.- М: Энергоатомиздат, 2004.-200 с.
  - 17.Колесников Б., Вильнюс Х, Хэрбек Л., Клейнберг М. Конструктивно-силовая схема и технология изготовления фюзеляжа пассажирского самолета из углепластика. С.736-741лсн. Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. Труды международной конференции 27-30 августа, 2003.-Знание, 2004. – 804с.
  - 18.Маркин В.Б. Строительная механика композитных конструкций: Учебное пособие.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. - 183с.
  - 19.Основы технологии переработки пластмасс. / Под ред. В.Н.Кузнецова и В.К.Гусева.- М.: Химия, 2004. – 596с.
  - 20.Fortran PPS for Fiber Applications. Filament and Nonwoven presentation, Ticona GmbH, may 2004, 37 p.
  - 21.S. Kmissios Filament Winding, Teclinisse Universiteit Delft, Netherlands, 2004.

22. Воробей В.В., Маркин В.Б. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей.- Новосибирск: Наука, 2003. - 164 с.
23. Технические свойства полимерных материалов: уч. справ. Пособие / В.К.Крыжановский, В.В.Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В.Крыжановская. - Спб., Изд-во «Профессия», 2003. – 240с.
24. Халиулин В.И., Шанаев И.И. Технология производства композитных изделий: Учебное пособие,- Казань: Изд-во ИСГТУ, 2003. – 368с.
25. Kunststoffe, 2003, Т. 93, №1, р40, №2, р.68.
26. Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф. И др. ПКМ в конструкциях ЛА. - ОНТИ ВИАМ Сб. «ПКМ», 2002.
27. Румянцев А.Ф. И др. Авиационные материалы и технологии. НТС ВИАМ. Вып.; под ред. Е.Н.Каблова, 2002. с 42 — 53.
28. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические модели расширения МАТ АВ: Специальный справочник СПГ, - Спб., 2001. -480 с.
29. Бологов Д.В. и др. Механика композитных материалов и конструкций. - №4,1999. с 125 — 130.
30. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология аэрокосмических конструкций из композитных материалов. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. - 516с.
31. Трофимов Н.Н. Данович М.З. Основы создания полимерных композитов.- М., Наука,1999. - 540 с.
32. Mathews F. L., Rawlings R.D. Composite materials Engineering and science, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 1999.
33. Белов Г. В., Ерохин Б. Т., Киреев В.П. Композиционные материалы в двигателях летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э. Баумана, 1998.
34. Васильев В. В. Механика конструкций из композитных материалов. - М.: Машиностроение, 1998. - 269с.
35. Воробей В. В., Василец В. И., Логинов Вас. Е., Логинов Вл. Е. Клеевые соединения в производстве двигателей летательных аппаратов/Учеб,

- пособие. — М.: Изд-во МАИ, 1998.
36. Тайманов И.А. Лекции по дифференциальной геометрии. Т. I. Кривые и поверхности. - Новосибирск: ИГУ, 1998.
37. Армированные пластики/В.А. Бунаков, Г.С. Головкин, Г.П. Машинская и др.; Под ред. Г.С. Головкина, В.И. Семенова. — М.: Изд-во МАИ, 1997. — 404 с.
38. Армированные пластики / Под ред. Г.С. Головкина и В.М. Семенова. - М.: Изд-во МАИ, 1997. с 268-305.
39. Воробей В.В. Технология производства конструкций из композиционных материалов. — М.: Изд-во МАИ; 1996. — 184 с.
40. Справочник кузнеца-штамповщика / В.И. Ершов, В.В. Уваров, А.С. Чумадин и др. — М.: Изд-во МАИ, 1996. — 352 с.
41. Технология неразрушающего контроля деталей и узлов летательных аппаратов: Учеб. пособие/В.В. Воробей, В.П. Копелев, В.Е. Логинов, З.И. Ускова. — М.: Изд-во МАИ, 1996. — 80 с.
42. Требования к матрицам конструкционных полимерных композиционных материалов: Учебное пособие / Ю.А. Михайлин, И.П. Мийченко, Ю.С. Первушин. - УФА: Изд-во УГАТУ, 1996. – 70с.
43. Шарипов Р.А. Курс дифференциальной геометрии. I. - Уфа: Изд. Баш. ГУ, 1996.
44. Никифоров А.Т., Канович М.З., Бардушкин В.В., Сычев М.А. Оценка трещиностойкости и монолитности полимерных связующих и стеклопластиков на их основе / Сборник научных трудов / Под. Ред. Ю.А. Чаплыгина, М.: МГИЭТ, 1994. -167 с.
45. Полевой СП, Евдокимов В.Д. Упрочнение машиностроительных материалов: Справочник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1994. — 496 с.
46. Межслойные эффекты в композитных материалах: Пер.с англ./Под ред. Н. Пейгано.- М.: Мир, 1993. - 346с.
47. Алфутов Н.А., Дымков И.А. Устойчивость металлокомпозитных

- оболочек при температурно-силовых воздействиях. В сб. научных трудов: Механика конструкций из композиционных материалов / Под общей ред. В.Д. Протасова. М.: Машиностроение, 1992. - 5 с.
48. Воробей В.В., Морозов Е.В., Татарников О.В. Расчет термонапряженных конструкций из композиционных материалов. — М.: Машиностроение, 1992. — 238 с.
49. Кодолов В.И. Полимерные композиты и технология изготовления из них деталей летательных аппаратов. Ижевск: ИМИ, 1992.
50. Мелешко А.И., Семенов В.И., Шайдуров В.С. Производство углеродных волокон и пластиков на их основе. /Под ред. Академика С.П. Половникова. Обзор, Серия VIII, №60, ГОНТИ-25, 1992. – 109с.
51. Морозов Е.В. Оптимальное проектирование композитных оболочек вращения. В сб. научных трудов: Механика конструкций из композиционных материалов / Под общей ред. В.Д. Протасова. М.: Машиностроение, 1992. - 219 с.
52. Солдатов С.А. Деформативность и прочность композитных баллонов давления. В сб. научных трудов: Механика конструкций из композиционных материалов / Под общей ред. В. Д. Протасова. М.: Машиностроение, 1992. - 339 с.
53. Кинлок Э. Адгезия и адгезивы. Наука и технология.- М.: Мир, 1991. – 194с.
54. Vazhenov S.L., Kozey V.V.J. Material Science, 1991. V.26. P. 6764'.
55. Берлин А.А., Вольфссон С.А., Ошмян В.Г., Ениколопов. Принципы создания полимерных композиционных материалов. М.: Химия. 1990. - 240с.
56. Композиционные материалы: Справочник/ В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общей редакцией В.В. Васильева, Ю.М. Тарнапольского. - М.: Машиностроение, 1990. - 512с.
57. Костин П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов: Учеб. пособие для профессионально-

- технических училищ. — М.: Машиностроение, 1990. — 256 с.
- 58.Общетехнический справочник/Е.А. Скороходов, В.П. Законников. А.Б. Пакнис и др.; Под общ. ред. Е.А. Скороходова. — 4-е изд., испр. — Машиностроение, 1990. — 496 с.
- 59.Технологичность конструкции изделия: Справочник /Ю.Д. Юрьев, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. —2-е изд., перераб. и доп. —М.: Машиностроение, 1990. - 768с.
- 60.Перов Б.В. Композиционные материалы в авиационной технике / Рос. хим. жур. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 1989. с. 476 — 483.
- 61.Полимерные композиционные материалы. Состояние и перспективы. Н.С. Ениколопян. ЖВХО. им. Д.И. Менделеева, т. 34 № 5, 1989, с. 435-437.
- 62.Строение и свойства авиационных материалов. / Под ред. А.Ф Белова, В.В.Николаенко. М.: Металлургия 1989. — 219 с.
- 63.Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. Крысин В.И., Крысин М.В. М.: Машиностроение, 1989. — 312 с.
- 64.Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. - 272с.
- 65.Гузь А.Н., Томашевский В.Т., Яковлев В.С. Технологические напряжения и деформации в композитных материалах. Киев: Высш.шк., 1988. - 270 с.
- 66.Дж. Любин Справочник по композиционным материалам: В 2 т. - М.: Машиностроение, 1988.
- 67.Механика конструкций из композиционных материалов. В.В.Васильев М.: Машиностроение. 1988. — 189с.
- 68.Структура и свойства волокон. Перепелкин К.Е. М.: Химия, 1988. — 18с.
- 69.Углеродные волокна и углекомпиты / Под ред. Э.Фитцера. Пер. С англ. - М.: Мир,1988. — 336 с.
- 70.Калинчев В.А., Макаров М.С. Намотанные стеклопластики.- М.: Химия, 1986. - 272с.

71. Лапицкий В.А., Крицук А.А. Физико-технические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков. - Киев: Наука и выдумка, 1986. – 92с.
72. Симонов-Емельянов И.Д., Кулезнев В.Н. Основы создания композиционных материалов: Учебное пособие.- М.: Изд-во МИХМ, 1986. – 86с.
73. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. И.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов. М.: Машиностроение, 1984. – 113с.
74. Гуняев Г.М. Проектирование высокомодульных полимерных композитов с заданными свойствами / Композиционные материалы. - М., 1981. - 29с.
75. Калинин В.А. О влиянии внешнего теплообмена на пропитку предварительно нагретого наполнителя. – Инж. – физ. журнал, 1981. – т.41, №2, 203с.
76. Кобец Л.П. Влияние обработки высокомодульных волокон на совместимость с полимерными связующими / Композиционные материалы. - М., 1981. - с 201-206.
77. Манин В.Н., Громов А.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. Л., Химия, 1980. - 248 с.
78. Бувевич Ю.А., Калинин В.А. О пропитке нагретого наполнителя вязкой жидкостью. – Инж. – физ. журнал, 1979. – т.36, №6, 997с.
79. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. - М.: Машиностроение. 1978.
80. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. - М.: Машиностроение, 1977. -144с.
81. Миткевич А.Б., Протасов В.Д. Равновесные стеклопластиковые баллоны давления минимальной массы при негеодезической намотке / Механика полимеров. 1975. №3. С. 983-987.
82. Елпатьевский А.Н., Васильев В.В. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов. - М.: Машиностроение, 1972. - 168с.

83. Евстратов С.В., Рябцева А.В. Перспективные технологии изготовления металлокомпозитных баллонов давления для ракетно-космической техники. – М., 2012.
84. Материалы XIII международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. – Москва, 2007.
85. Материалы XIV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, том 1. – Ярополец, 2008.
86. Материалы XV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, том 1. – М., 2009.
87. Воробей В. В., Евстратов С.В. Новые направления в современной технологии намотки конструкций из композиционных материалов // Вестник Московского авиационного института. - 2009, т. 16, № 1, с. 61-72.
88. Воробей В. В., Евстратов С.В. Технология изготовления воздухозаборника сверхзвукового самолета методом намотки // Вестник Московского авиационного института. - 2013, т. 20, № 4, с.99- 109.