

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ЛУГАНСКОЙ
НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ «ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

На правах рукописи

Сыровой Геннадий Владимирович



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ПРОИЗВОДСТВА МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ ИЗ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

05.02.08-Технология машиностроения

Диссертация

на соискание учёной степени

кандидата технических наук



Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Витренко В. А.

Идентичность всех экземпляров

диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ:

Ученый секретарь диссертационного

совета Д 01.014.02



Р.М. Грубка

Луганск-2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА НАМОТКИ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОРПУСОВ	13
1.1. Анализ технологических способов и параметров намотки композитных корпусов	13
1.2. Анализ используемого оборудования и приспособлений для технологического процесса намотки	24
1.3. Анализ волокнистых наполнителей и связующего, используемого в технологическом процессе намотки	31
1.4. Цель и основные задачи исследования	37
РАЗДЕЛ 2.РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, СПОСОБА И ПРОГРАММЫ НАМОТКИ, ПОВЫШАЮЩИХ КАЧЕСТВО ПРОИЗВОДСТВА МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ	41
2.1. Обоснование технологического процесса намотки малогабаритных корпусов как объекта исследования	41
2.2. Разработка технологического оборудования и оснастки для намотки малогабаритных корпусов	41
2.2.1. Разработка устройств технологического оборудования, обеспечивающих повышение качества производства малогабаритных корпусов	42
2.2.2. Разработка пропиточно-формующего тракта с равномерным натяжением армирующего материала	46
2.2.3. Разработка удлинителя хода раскладчика армирующего материала	49
2.3. Разработка способа укладки армирующего материала на сложнопрофильную поверхность оправки.....	52
2.4. Разработка способа укладки армирующего материала на цилиндрическую и коническую поверхности оправки.....	54
2.5. Разработка модели композитного материала для расчета структуры намотки малогабаритных корпусов.....	56
2.5.1. Обоснование выбора систем координат, обеспечивающих процесс намотки малогабаритных корпусов.....	57
2.5.2. Определение упругих констант композитного материала для моделирования процесса намотки	60
2.5.3. Расчёт структуры намотки композитного материала, на примере элемента малогабаритного корпуса	63
2.6. Разработка управляющей технологической программы намотки малогабаритных корпусов	70
2.7. Выводы	72

РАЗДЕЛ 3. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА МАССОВОЕ СОВЕРШЕНСТВО МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ	74
3.1. Оборудование и оснастка для проведения экспериментальных исследований малогабаритных корпусов	74
3.1.1. Установка для пневматического испытания малогабаритных корпусов	74
3.1.2. Установка для гидравлического испытания малогабаритных корпусов	77
3.1.3. Установка для циклического испытания малогабаритных корпусов	80
3.2. Экспериментальные исследования влияния структуры намотки армирующего материала на массовое совершенство малогабаритных корпусов	83
3.2.1. Исследование шага намотки армирующего материала на деформационные свойства оболочки малогабаритного корпуса	83
3.2.2. Исследование комбинированной структуры намотки армирующего материала на деформационные свойства и массовое совершенство малогабаритного корпуса	93
3.2.3. Исследование зонной структуры намотки днища на массовое совершенство малогабаритного корпуса	105
3.3. Выводы	114
РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАМОТКИ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ НА ОСНОВЕ НАНОМОДИФИКАЦИИ МАТРИЦЫ	115
4.1. Технологическое обеспечение намотки малогабаритных корпусов на основе наномодификации эпоксидной матрицы	115
4.1.1. Исследование и идентификация наномодификаторов эпоксидной матрицы	115
4.1.2. Разработка технологических режимов получения наномодифицированных полимерных композитов	120
4.1.3. Разработка механизма взаимодействия наномодификаторов с полимерной матрицей	124
4.2. Методика технологического процесса намотки на основе наномодифицированного полимерного композита	128
4.3. Исследование свойств полимерного композита на основе наномодификации полимерной матрицы	134
4.3.1. Экспериментальное исследование образцов полимерного композита на адгезионную прочность	134
4.3.2. Экспериментальное исследование образцов полимерного композита на герметичность	136
4.3.3. Экспериментальное исследование образцов полимерного композита на теплопроводность	138

4.4. Экспериментальное определение конструкционной прочности наномодифицированного полимерного композита в структуре малогабаритного корпуса	143
4.4.1 Конструкционная прочность микропластика на основе наномодификации матрицы.....	143
4.4.2 Конструкционная прочность армирующего материала в цилиндрической части малогабаритного корпуса	146
4.5. Выводы.....	148

РАЗДЕЛ 5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НАМОТКИ РЕАЛЬНЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ	150
5.1. Формы и характер внедрения результатов исследования	150
5.2. Технологический процесс изготовления малогабаритного корпуса РДТТ ракеты с металлическими фланцами	153
5.3. Технологический процесс изготовления корпуса транспортно-пускового контейнера из стеклопластика	156
5.4. Внедрение результатов работы в производство	157
5.5. Основные рекомендации работы	162
5.6. Выводы	166

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	168
------------	-----

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	170
-------------------	-----

ПРИЛОЖЕНИЕ 1	
Расчет толщин армирующего материала реального баллона БК-2-200.....	186
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	
Технологическая программа намотки малогабаритного баллона БК-2-200	195
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	
Расчет ожидаемого экономического эффекта.....	198
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	
Акты испытания и внедрения результатов работы.....	202

ВВЕДЕНИЕ

Постоянно развивающийся научно-технический прогресс требует от машиностроителей решения более сложных задач, связанных с созданием новых структурных свойств изделий, повышением эффективности их эксплуатации, автоматизацией производственных процессов изготовления и обеспечением экологической безопасности производства. Это обусловлено современными запросами общества, возможностями науки и техники, а также развитием экономики. Все это в полной мере относится к технологии изготовления изделий из композиционных материалов, являющихся одним из направлений в машиностроении. В настоящее время продолжают применяться малогабаритные корпуса, такие как баллоны давления, пробоотборники, порошковые огнетушители и т.д. которые из-за внедрения новых композиционных материалов постоянно требуют улучшения их качественных параметров, конструктивного совершенствования и эксплуатационных свойств.

При этом особым направлением развития является технологический процесс намотки баллонов давления для дыхательных систем МЧС и средств спасения и жизнеобеспечения. Соответственно к таким изделиям предъявляются повышенные требования по обеспечению их малогабаритности конструкции, надежности и ресурсообеспечению.

Прочность, долговечность и надёжность работы малогабаритных корпусов из композиционных материалов в значительной степени определяются свойствами используемого при намотке композитного материала, структурных изменений свойств материала и температурных процессов, а также технологического процесса.

Совершенствование технологических процессов, методов и технологического обеспечения намотки является одной из важнейших задач совершенствования малогабаритных корпусов из композиционных материалов, определяющих технико-экономические параметры их изготовления и эксплуатации.

Актуальность темы исследования. Прогресс в технологии изготовления армирующих полимерных волокон и дальнейшее улучшение их прочностных характеристик дают новые возможности для повышения качества производства изделий из композиционных материалов. Такими изделиями являются малогабаритные корпуса: металлопластиковые баллоны давления, для дыхательной аппаратуры и средств медицинской техники, маршевые двигатели летательных аппаратов, транспортно-пусковые контейнеры, порошковые ствольные огнетушители и др., работающие в сложных условиях эксплуатации, и к которым предъявляются высокие требования.

Несовершенство технологического оборудования, используемого для изготовления изделий из композиционного материала, низкий уровень автоматизации этого оборудования, разброс параметров технологического процесса формирования поверхностного слоя из композиционного материала, термообработка, механическая обработка, приводят к возникновению различного рода производственным дефектам, снижающих несущую способность и работоспособность изготавливаемых малогабаритных корпусов.

Многообразие полимерных волокон и матричных материалов, различных схем армирования, позволяют направленно регулировать прочностные, жесткостные, теплопроводные и другие свойства малогабаритных корпусов путем подбора структуры, соотношения компонентов и разработки технологической оснастки для намотки малогабаритных корпусов.

Дальнейшее развитие технологического процесса повышения качества производства малогабаритных корпусов невозможно без применения современных расчётных компьютерных систем, которые, на начальном этапе изготовления позволяют смоделировать и выбрать определенную технологическую схему структуры армирования при намотке.

На основании выше изложенного, можно утверждать, что разработка технологического обеспечения качества производства малогабаритных корпусов из композиционных материалов на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных

композиционных материалов с изменением структуры армирования и наномодификации полимерной матрицы при намотке является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы.

Вопросам технологического обеспечения производства изделий из композиционных материалов посвящено большое количество исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов из которых, можно выделить публикации И.Ф. Образцова, В.В. Васильева, В.А. Бунакова, В.И. Бутенко, Г.А. Молодцова, И.М. Буланова, В.Д. Протасова, А.Б. Миткевича, Е.Ф. Харченко, В.И. Маринина, Ю.И. Битюкова, В.А. Калинина, Ю.И. Денискина, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпова, В.А. Рач, В.А Цопы, И.В. Малкова, В.С. Ивановского и других известных учёных.

Несмотря на значительный объем исследований в данной области, отсутствуют рекомендации и технические решения по повышению массового совершенства и общего ресурса малогабаритных корпусов. Причина заключается в недостаточном исследовании технологических режимов, оборудования и оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования и наномодификации полимерной матрицы при намотке.

Выполненные в данной работе исследования направлены на разработку технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных корпусов на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования.

Цель и задачи исследования. Целью данной диссертационной работы является разработка технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных корпусов на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования

и наномодификации полимерной матрицы при намотке, повышающее их массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующего технологического обеспечения процесса намотки малогабаритных композитных корпусов.

2. Разработать технологическое оборудование, способ и управляющую программу автоматизированной намотки, повышающих качество производства малогабаритных корпусов из полимерных композитных материалов с использованием расчетных компьютерных систем.

3. Экспериментально определить влияние основных структурно-технологических параметров процесса намотки малогабаритных композитных корпусов на массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

4. Разработать технологический процесс намотки на основе наномодификации полимерной матрицы для повышения качества производства малогабаритных корпусов.

5. Внедрить результаты работы: разработанный технологический процесс, технологическое оборудование и программное обеспечение для намотки малогабаритных корпусов из полимерного материала на производственных предприятиях и в учебном процессе.

Объект исследования. Технологический процесс намотки малогабаритных корпусов из композиционных материалов.

Предмет исследования. Технологические методы и модели повышения функциональных характеристик малогабаритных корпусов и эффективности композитного материала.

Научная новизна исследования. В работе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание технологического обеспечения процесса намотки малогабаритных корпусов из композиционных материалов, повышающего их массовое совершенство,

деформационные свойства и общий ресурс. Наиболее существенными элементами научной новизны являются следующие результаты:

1. Впервые установлено, что варьирование структурных схем и направления укладки армирующего материала на поверхность оправки малогабаритных корпусов уменьшают напряженное состояние, позволяют расширить диапазон изготавливаемых изделий и повысить производительность на 15-20 %.

2. Экспериментально определены рациональные структурно-технологические параметры намотки малогабаритных корпусов из полимерного композитного материала с различными физико-механическими свойствами, позволившими повысить их массовое совершенство.

3. Впервые установлено, что включение наномодификаторов в полимерную матрицу повышает конструкционную прочность на 10-15% и эксплуатационный ресурс намотанных малогабаритных корпусов в 1,5-1,8 раза.

Теоретическая значимость работы.

1. Разработаны схемы укладки армирующего материала на поверхность малогабаритной оправки сложной формы, включающую в себя алгоритм движения рабочих органов намоточного станка при переходе от одного витка к другому, и общая методика расчета управляющей программы намотки, позволивших повысить производительность намотки.

2. Разработана модель композитного материала для расчета структуры намотки малогабаритных корпусов.

3. Определены рациональные структурно-технологические параметры намотки малогабаритных корпусов, обеспечивающие повышение долговечности, за счет увеличения прочности и жесткости конструкции.

4. Установлен общий подход взаимодействия модификаторов различной природы с полимерной матрицей и алгоритм намотки малогабаритных корпусов на основе наномодификации матрицы полимерного материала.

Практическая значимость работы.

1. Разработанные технологические режимы и технологическое оборудование процесса намотки повышают ресурс эксплуатации малогабаритных

корпусов в два раза и снижают массу конструкции на 11-15% в зависимости от предъявляемых условий эксплуатации.

2. Разработанный способ укладки армирующего материала на поверхность оправки позволяет повысить качество технологического процесса намотки малогабаритных корпусов повышающего их массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

3. Предложенные рекомендации по выбору наномодификаторов эпоксидной матрицы позволяют увеличить показатели прочности на 15%, герметичности и теплопроводности на 30% для различных вариантов технологических процессов и определять их рациональные структурные параметры.

4. Разработана конструкция формирующего и ленточно-пропиточного тракта, а также испытательного оборудования, защищенных авторскими свидетельствами позволяющих повысить эксплуатационные характеристики малогабаритных корпусов.

5. Результаты работы внедрены на ПАО «Луганский завод горноспасательного оборудования «Горизонт», Луганском МЧП «Донбасс-сервис» и в учебном процессе Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Луганской Народной Республики "Луганский национальный университет имени Владимира Даля", общий ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 455000,00 рублей РФ.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач исследования и получения результатов, обладающих новизной, использован следующий комплекс методов и научных положений: основные положения, принципы, методы и правила технологии машиностроения, основные положения, принципы и методы механики твердого деформируемого тела при анализе напряжённо-деформируемого состояния и методы оптимального проектирования. При разработке метода численного моделирования малогабаритных композитных корпусов на основе полимерного

композита в компьютерных расчетных системах использован метод конечных элементов (МКЭ).

Компьютерное моделирование выполнено с использованием пакета программ конечно-элементного анализа LS-DYNA 971 и ANSYS. Экспериментальное исследование образцов полимерного композитного материала (ПКМ) и натуральных малогабаритных корпусов проводилось на специально разработанных установках для пневматических, гидравлических и циклических испытаний. Изучение структурных параметров наномодифицированного полимерного композитного материала выполнено методом рентгеноструктурного анализа. При этом рентгенограммы получены на дифрактометре ДРОН-И. Исследования базировались на методах планирования эксперимента, обработка результатов эксперимента и проверка адекватности математических моделей выполнялась согласно ГОСТ 8.207-76 с помощью стандартных пакетов прикладных программ Mathcad 15.0 и STATISTICA 6.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные научные разработки и положения:

- научное положение о том, что при укладке армирующего материала на поверхность оправки малогабаритных корпусов позволяет уменьшить значения деформационных напряжений в зонах перехода при намотке;

- научное положение о том, что формирование рациональных структурно-технологических параметров намотки имеет закономерный характер и влияет на технологический процесс намотки;

- научное положение о том, что наномодификаторы влияют на структурные параметры технологического процесса и приводят к изменению эксплуатационных показателей малогабаритных корпусов;

- научное положение о влиянии структуры укладки армирующего материала на массовое совершенство малогабаритных корпусов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность диссертационной работы обеспечена:

- использованием современных физико-технических методов для решения инженерных задач по определению характеристик малогабаритных корпусов;
- получением и обоснованием данных по результатам испытаний малогабаритных корпусов на натурном стенде с сертифицированными средствами измерений;
- согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований с точностью, необходимой для определения характеристик малогабаритных корпусов конкретной конструкции.

Основные научные положения и результаты исследований были доложены и обсуждены на: I и II Международной научно-практической конференции «Технологии, материалы, транспорт и логистика: перспективы развития» (2010-2011 г. г., Ялта, Украина), 7-й Московской международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов» (2015 г., Москва, Россия), научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Восточноевропейского национального университета имени Владимира Даля (2008-2014, г. Луганск, Украина), 3-ей Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах» (Тамбов, Россия, 2016 г.), VIII Международной научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (Тамбов, Россия, 2016 г.);

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 122 наименования и приложения с методиками и актами внедрения результатов работы. Диссертация содержит 116 рисунков и 26 таблиц. Общий объем работы - 208 страниц.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА НАМОТКИ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОРПУСОВ

Создание малогабаритных корпусов с максимально высокими гарантийными показателями качества при заданных производственных условиях наиболее экономично и эффективно, когда выбор исходных компонентов, разработка технологии и средств её реализации рассматриваются как равнозначные стороны одного процесса. Причем, показатели качества корпусов увязываются со структурными параметрами композитного материала (КМ), величины которых зависят от конструкционных и эксплуатационных факторов, технологических параметров изготовления корпусов, а также особенностей используемого оборудования.

1.1. Анализ технологических способов и параметров намотки композитных корпусов

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов получения внешнего слоя для композитных корпусов (КК) на основе армированного волокнистого материала является намотка. Методом намотки изготавливаются изделия, имеющие форму тел вращения: баллоны давления, баки, корпуса ракетных двигателей, головные обтекатели, отсеки ракет, транспортно-пусковые контейнеры, цистерны, трубопроводные магистрали, силовые шпангоуты, воздухосборники самолётов, лопасти винтов вертолётов, различные профили, пространственно-изогнутые отводы труб [31,34,42,47,49,51,68,70,73,85,109,110].и т.д.

Созданная Образцовым И.Ф., Васильевым В.В. и Бунаковым В.А. теория оптимального армирования оболочек вращения из композиционных материалов

[76], дало развитие методу намотки в дальнейших работах их учеников [52,35,9], а также в целом ряде технологий разработок различных фирм [99].

Так за этот период были проведены научные изыскания и опубликованы работы Ивановского В.С. [35] по технологическим способам намотки, повышающим прочностные свойства малогабаритных оболочек давления. В данной работе рассмотрены способы повышения прочности органоволокон при намотке цилиндрической части малогабаритных оболочек.

В кандидатской работе Малков И.В. [52] проводит оптимизацию спирально-кольцевой намотки малогабаритных цилиндрических корпусов структурно-технологическими методами, при этом обращает внимание на формирование сетчатой намотки.

В докторской диссертации Рач В.А. [86] по созданию корпусов малогабаритных РДТТ одноразового и кратковременного действия разработаны научно обоснованные технологические методы намотки корпусов малогабаритных РДТТ одноразового и кратковременного действия.

Данная диссертация содержит результаты по основам структурно-технологического подхода для создания малогабаритных корпусов, особенностям их изготовления методом намотки.

На основании данных работ можно выделить область малогабаритных корпусов, которая напрямую зависят от структурных и технологических параметров намотки (рис.1.1).

Из рисунка 1.1 видно наличие двух областей намотки корпусов: область малогабаритных корпусов, у которых радиус ($R < 15$ см) и крупногабаритных корпусов с радиусом ($R > 15$ см). Первая область наиболее чувствительна к изменению габаритных размеров изделия. Незначительное изменение размеров изделия приводит к существенному изменению технологических параметров, таких как натяжение (N) и контактное давление (q), что в свою очередь может привести к изменению прочностных характеристик армирующего материала, а значит и всего изделия в целом.

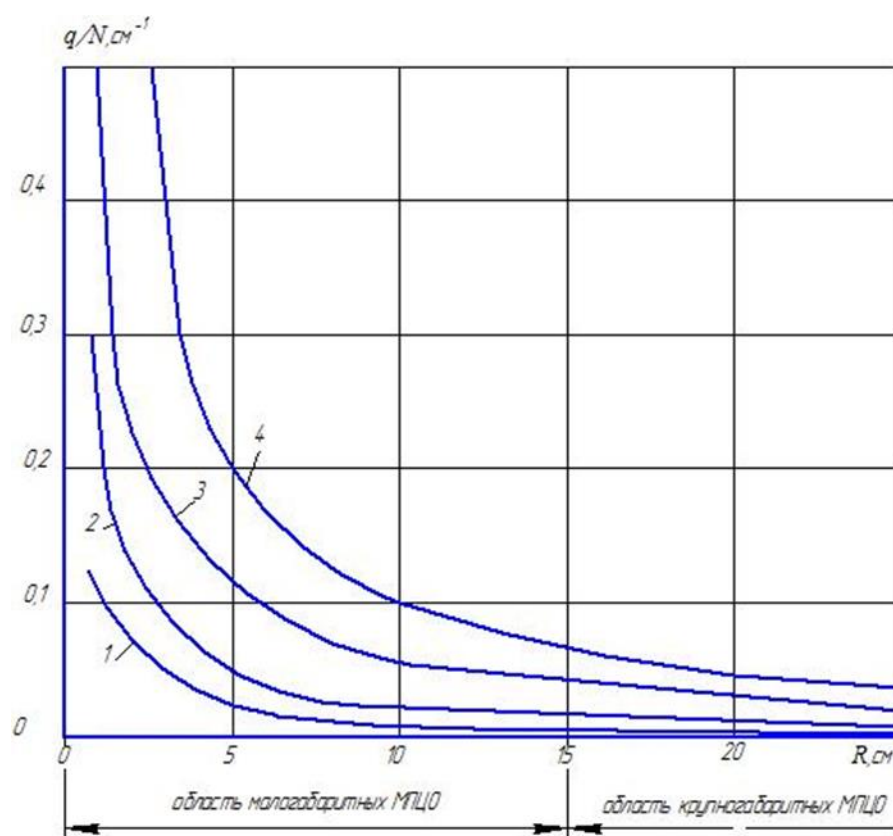


Рисунок 1.1. Зависимость малогабаритности от технологических параметров и угла армирования:

$$1 - \varphi = 20^{\circ}, 2 - \varphi = 30^{\circ}, 3 - \varphi = 45^{\circ}, 4 - \varphi = 90^{\circ}$$

Следовательно, сущность метода намотки состоит в том, что непрерывный волоконный материал наматывается на вращающуюся оправку, образуя слои и формируя при этом требуемую толщину и структуру стенки малогабаритного корпуса. Исходя, из конфигурации оправки форма наматываемого изделия может быть сложной либо простой [6].

Для технологического процесса намотки пригоден практически любой непрерывный армирующий материал (стекло-, угле- и органическое волокно) [10]. Последовательные слои наносятся под одним и тем же или под разными углами намотки, пока не будет набрана нужная толщина. Угол намотки может изменяться от малого 0° - продольного, до большого 90° -кольцевого, относительно оси вращения оправки [93].

Технология изготовления изделий из полимерного композитного материала (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 данного процесса, изготовления изделий на станках с программным управлением.

Способы намотки можно классифицировать по способу совмещения связующего материала и наполнителя, и по схеме укладки армирующего материала [31].

По способу совмещения различают два способа: «сухую» и «мокрую» намотку [16].

Способ "сухой" намотки заключается в том, что волокнистый армирующий материал перед формованием предварительно пропитывают связующим и подсушивают на пропиточных машинах. При этом 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. 1.2.

Для программной намотки изделия в зависимости от его сложности применяют от 3 до 5 координатный намоточный станок с управлением и перемещением раскладочного устройства.

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.

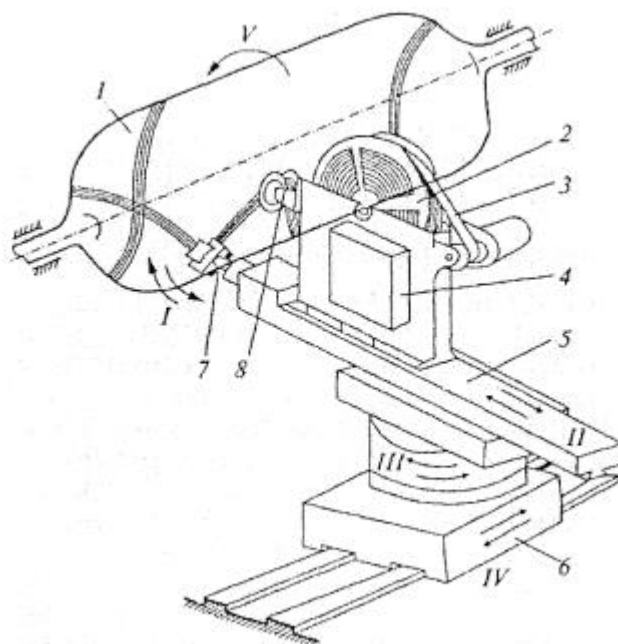


Рисунок 1.2. Способ "сухой" намотки изделия препрегом:

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

Способ "сухой" намотки наиболее эффективен для намотки крупногабаритных изделий за счет высокой производительности: скорости намотки, которая не лимитируется условиями пропитки наполнителя и стабильностью степени армирования, т.е. соотношения наполнитель – связующее. Применение больших значений технологического натяжения, для укладки препрегов, не делает возможным применение этого способа для намотки малогабаритных корпусов.

При способе "мокрой" намотки (рис. 1.3) совмещены пропитка волокнистого армирующего наполнителя связующим и намотка на оправку. При намотке, нити проходят через нагревательные спирали и индивидуальные натяжители, собираются в прядь и, поступают в пропиточно-натяжной тракт. Пропитка армирующего волокнистого материала связующим может проходить одним из следующих способов: протягиванием пряди нитей через ванночку со

связующим; окунанием в связующее с помощью ролика или принудительная пропитка в клиновой или вакуумной камере.

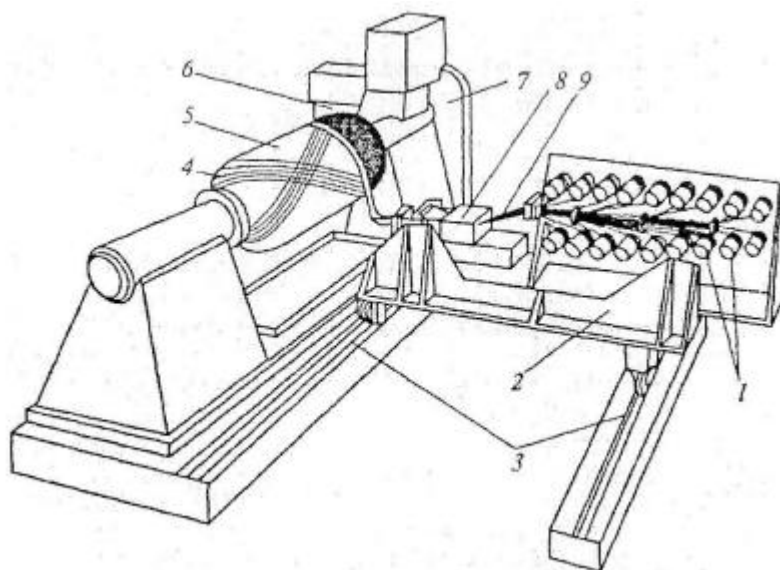


Рисунок 1.3. Способ мокрой намотки

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 прядь

После пропитки излишек связующего отжимается, прядь нитей натягивается, проходит через систему контроля натяжения и через раскладывающее устройство (нитераскладчик) 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 наиболее подходит для изготовления малогабаритных оболочек сложной конфигурации [90].

Однако существующий способ "мокрой" намотки [91] имеет следующие недостатки: невысокую скорость намотки, ограниченную скоростью пропитки

нитей связующим; неравномерное содержание связующего по толщине наматываемого изделия; большого количества отходов связующего в пропиточной ванне и выдавленного излишка связующего из наматываемого изделия; загрязнения пропиточно-формующего тракта и рабочего места связующим.

При намотке применяется еще способ «раздельного» формования, который состоит в намотке заготовки и дальнейшей пропитке связующим [16].

По укладке армирующего материала на оправку, намотка делится на следующие схемы (рис. 1.4).

При прямой (кольцевой, радиальной) схеме намотки (на рис. 1.4 не показано), угол намотки φ (угол между образующей оболочки и касательной к плоскости наполнителя в месте его укладки на оправку) равен 90° .

Спирально-винтовая схема намотки (тангенциальная, винтовая) (рис. 1.4 а) заключается в том, что ленточный волокнистый полуфабрикат укладывается на поверхность оправки по винтовой линии плотными рядами. Данную схему 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.

Продольно-поперечная схема намотки (продольно-кольцевая) (рис. 1.4 б) – заключается в формировании продольно-поперечной структуры композита, путём чередования слоёв, полученных укладкой однонаправленного ленточного полуфабриката вдоль образующей (продольные слои с углом намотки $\varphi = 0-5^\circ$), и намоткой лент в кольцевом направлении (поперечные слои с $\varphi = 80-90^\circ$).

Спирально-перекрёстная схема намотки (рис. 1.4 в) – заключается в укладке ленты или нити на оправку по спирали, с подачей, превышающей ширину ленты в целое число раз. Таким образом, вся поверхность оправки будет закрыта нитями за несколько технологических проходов. Эта схема является наиболее распространённой для изготовления изделий, имеющих форму тел вращения с произвольной образующей: цилиндров, конусов, сфер, баллонов давления и имеет большой диапазон возможностей по конструированию различных схем укладки

волокнистого армирующего материала в соответствии с действующими нагрузками.

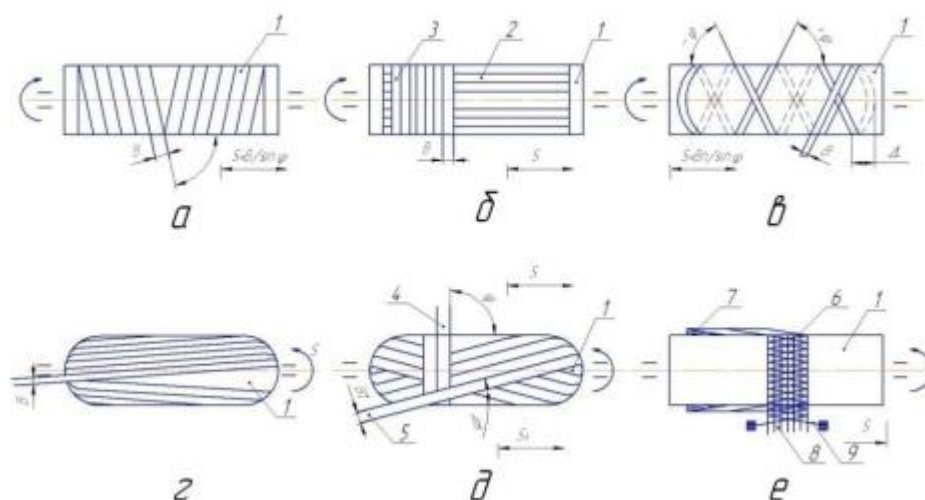


Рисунок 1.4. Схемы намотки, различающиеся типом укладки армирующего материала [6]:

а - спирально - винтовая; б - продольно - поперечная; в - спирально - перекрёстная; г – плоскостная; д - совмещенная спирально - кольцевая; е - косослойная продольно - поперечная;

1 - оправка; 2 - слой продольного армирования; 3 - слой поперечного армирования; 4 - лента для кольцевой намотки; 5 - лента для спирально – перекрёстной намотки; 6 - технологическая псевдолента; 7 - технологический конический элемент; 8 - однонаправленная лента для кольцевого армирования; 9 - нити осевого армирования

Плоскостная схема намотки (полюсная, орбитальная) (рис. 1.4 г) – осуществляется намоткой армирующего полуфабриката, укладываемого на оправку плоскими непрерывными витками встык под заданным углом наклона близким к 0° , в зависимости от диаметров полюсных отверстий. Раскладчик нити остается неподвижным относительно наматываемого изделия или вращается вокруг неподвижной оправки (орбитальная намотка). После каждого витка оправка перемещается на расстояние, соответствующее ширине наматываемой ленты.

Совмещённая спирально-кольцевая схема намотки (рис. 1.4 д) заключается в одновременной намотке спиральных и кольцевых слоёв, осуществляемых с двух самостоятельных раскладывающих устройств, движение которых согласовано с вращением оправки. Эту схему применяют для изготовления намоткой изделий цилиндрической и конической форм с углом конусности не более 20° .

Такая схема намотки исключает вынужденную обрезку ленты армирующего материала, при переходе от намотки спиральных слоёв к кольцевым слоям. Упрощает замыкание структуры намотки и увеличивает производительность намотки на 35-40 %. Недостатком рассматриваемой схемы намотки является нарушение регулярности структуры намотки, проявляющееся в виде образования многочисленных пересекающихся узлов.

Косослойная продольно-поперечная схема намотки (рис. 1.4 е) заключается в том, что слой продольно-поперечного армированного материала формируется не на всей длине оправки, а в пределах технологической псевдоленты, получаемой из нескольких нитей или жгутов, непосредственно при намотке изделия и укладываемой на оправку спирально-винтовым методом. Косослойная структура композита обеспечивает повышенную сдвиговую прочность наматываемого изделия в осевом направлении, но снижает механические характеристики при растяжении-сжатии в этом направлении.

Исходя из выше сказанного, для технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных корпусов выбираем способ «мокрой» намотки с параметрами, которые условно можно разделить на три группы – технологические, дискретные и структурные (рис. 1.5).

Технологические параметры намотки отражают конкретный способ изготовления изделия, к ним относятся: натяжение и температура пропитки, которые к настоящему времени не входят в расчетные зависимости как самостоятельные. Их оптимальные значения определяются только экспериментальным путем. Информацию об их параметрах несет одна из характеристик КМ (прочность, модуль упругости и т.п.). В процессе намотки их

величины поддерживаются с некоторой точностью в определенном диапазоне [86].



Рисунок 1.5. Параметры процесса намотки композитных корпусов

Параметры второй группы являются величинами дискретными, так как они определяют структуру цикла намотки и контролируются счётными устройствами.

Параметры третьей группы названы структурными, т.к. в основном их величины определяют такие структурные параметры как «толщина элементарного слоя», «вид микроструктуры слоя». В эту же группу включены параметры относительной толщины и ширины ленты, которые будут определять вид

микроструктуры слоя. Их величина должна определять оптимальность таких технологических параметров как натяжение и содержание связующего в ленте. Изучением параметров этой группы необходимо уделить основное внимание в технологическом процессе производства изделий из КМ.

Как известно технологические параметры сильно влияют на характеристики изделий из КМ, так как перечень параметров всех классов (структурных, технологических т.д.) может расширяться и уточняться.

Анализ литературных источников позволил выделить основные параметры, влияющие на повышение качества производства корпусов из КМ: натяжение армирующего материала (АМ), содержание связующего в слоях армирующего материала, ширина и шаг намотки формуемой ленты.

Влиянию роли натяжения АМ на выходные параметры наматываемых изделий уделено внимание во многих работах [35,58,70,85]. Считается, что за счет натяжения можно изменить качество намотки на 30%.

Главное значение натяжения заключается в обеспечении необходимого давления формования в процессе намотки, и что натяжение в сочетании с другими технологическими параметрами может способствовать выпрямлению нитей и обеспечению равномерного содержания связующего по всей толщине слоев АМ.

Все существующие работы рассматривают натяжение структурного элемента наматываемого корпуса-ленты и отсутствуют работы, рассматривающие падение натяжения в слоях изделия вследствие упругой деформации оправки и выдавливания связующего.

Литературные данные, касающиеся влиянию шага намотки на прочностные свойства изделий, практически отсутствуют. В то же время этот параметр играет важную роль в ориентации наполнителя, обеспечении равномерного натяжения АМ и получению однородной структуры с минимальной пористостью [93].

Содержание наполнителя является также важным параметром, влияющим на прочностные свойства композита. Оптимальное значение этого показателя зависит от используемых компонентов, вида нагружения и условий эксплуатации изделия [27].

В то же время существуют работы [115,116], показывающие, что матрица вообще не влияет на прочность нитей, так как разрушение происходит по волокнам, а матрица несет только функцию формообразования.

В зависимости от стадии создания изделия (начальная, эскизный проект, доводка изделия) и требования к величине параметра качества рассмотрение КМ может вестись на уровне квазиоднородного, анизотропного, слоистого или структурно-неоднородного материала. При рассмотрении КМ как структурно-неоднородного на уровне слоя необходимо учитывать такие параметры как диаметр армирующих волокон, размер прослоек матрицы, вид микроструктуры и т.д. Эти параметры объединены в группу «микроструктурные» и входят в структурные параметры намотки. К этой группе следует отнести все характеристики компонентов пластика: арматуры, матрицы и границы раздела арматура-матрица. Это обусловлено тем, что значение микроструктурных параметров и характеристик компонентов позволяет рассчитать механические характеристики слоя как исходного элемента слоистого пакета.

Проведенный анализ работ о влиянии структурно-технологических параметров приводит к необходимости проведения комплексного исследования по разработке технологического обеспечения повышение качества производства корпусов из КМ.

1.2. Анализ используемого оборудования и приспособлений для технологического процесса намотки

Основным комплексным критерием качества для малогабаритных корпусов остаётся параметр массовой эффективности [87], который равен отношению энергоёмкости корпуса к его массе

$$W=PV/M, \quad (1.1)$$

где P -разрушающее внутреннее давление в корпусе;

V -внутренний полезный объём;

M -масса силовой части корпуса.

Данный критерий отражает совершенство силовой схемы малогабаритного корпуса и степень реализации исходной прочности используемого композитного материала, которые в значительной степени зависят от проектных решений, заложенных в технологическую схему производства [105].

Добиться оптимального результата при изготовлении композитных корпусов позволяет используемое технологическое оборудование и приспособления. Другими словами, процесс формообразования изделия должен быть совмещен с процессом формирования заданной структуры материала, обеспечивающей требуемые свойства конструкции. Эта сложная конструкторско-технологическая и материаловедческая задача может быть решена лишь на пути автоматизированного проектирования композитных конструкций и методов их изготовления намоткой, выкладкой, прессованием, пултрузией и др. на производственном оборудовании, имеющим числовое программное управление [65].

В настоящее время довольно четко определилась типовая схема намоточного станка для намотки изделий «мокрым» способом (рис.1.6). Она включает в себя такие основные элементы: шпулярник (10), с установленными на нем шпулями армирующего материала (АМ) (стекло-, органо-, угленить или жгут), нитесборника (9) формирующего ширину ленты, пропиточного устройства для нити, состоящего из пропиточного ролика (7), отжимной фильеры (3),

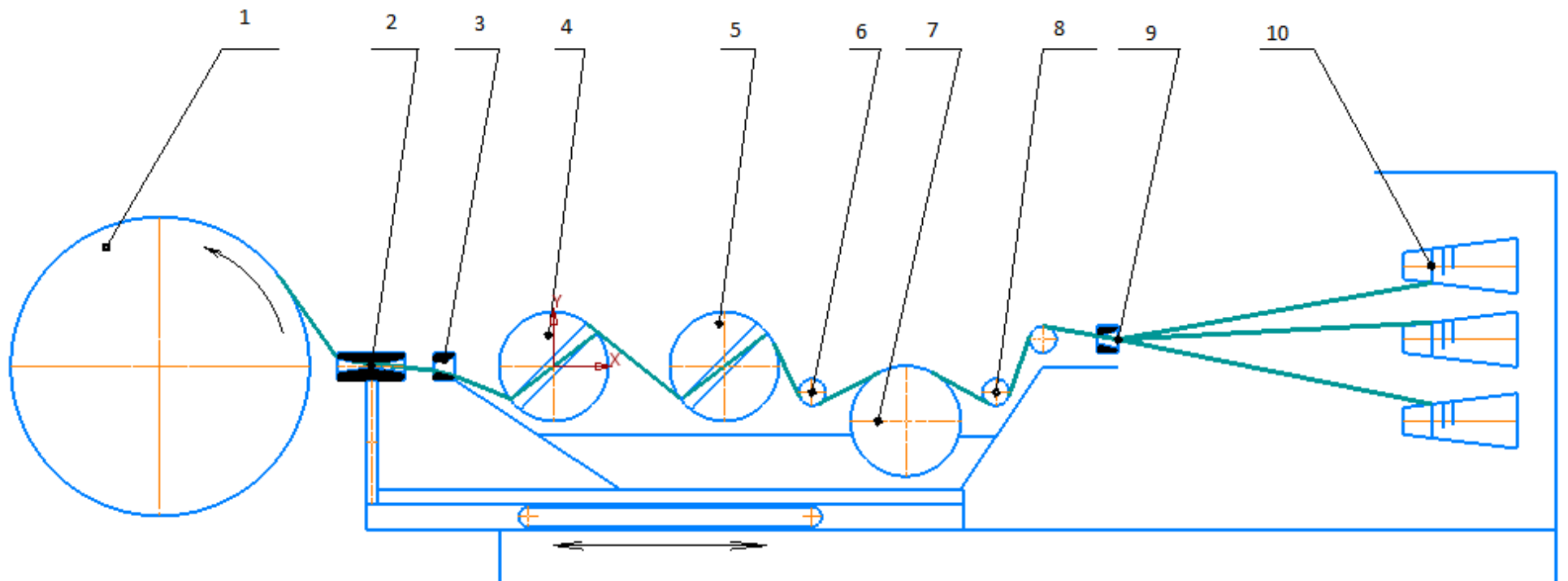


Рисунок 1.6. Типовая схема пропиточно-формирующего тракта

1- Оправка; 2 – Нитеукладчик; 3 – Фильера отжимная; 4 – Датчик натяжения; 5 – Натяжитель ленты; 6,8 – Ролик формирующий; 7 – Ролик пропиточный; 9 – Нитесборник; 10 – Шпулярник.

натяжного ролика (5) и датчика натяжения ленты (4), нитеукладчика (2) предназначенного для укладки пропитанного связующим АМ на оправку (1) [36].

Типичные конструктивные схемы исполнения намоточных станков, используемых для реализации метода намотки, представлены на рис. 1.7-1.9.



Рисунок 1.7. Намоточный станок с вынесенным приводом вращения и стойкой закрепления оправки

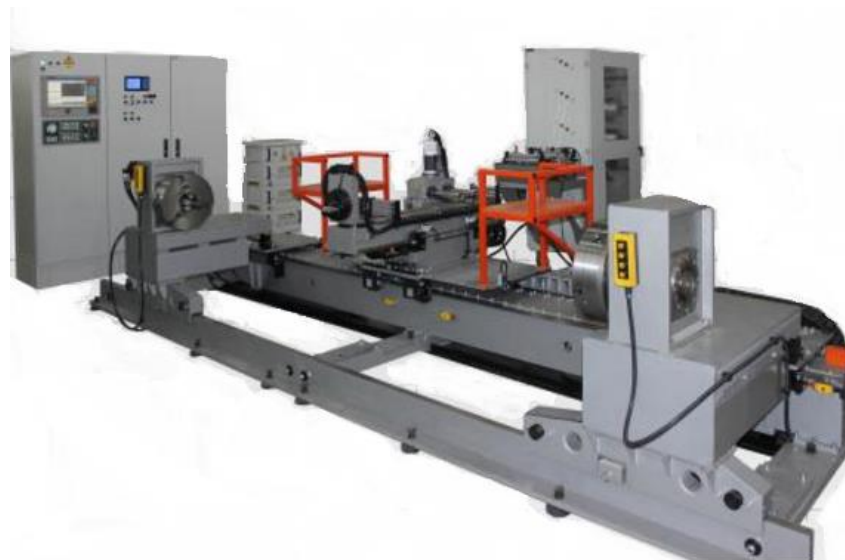


Рисунок 1.8. Пятикоординатный намоточный станок с вынесенным приводом вращения и единой стойкой закрепления оправки

На рис. 1.7 приведен намоточный станок, выполненный по схеме с вынесенным приводом вращения и стойкой закрепления оправки.

На рис. 1.8 станок токарного типа предназначен для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом «мокрой» намотки в условиях единичного, мелко- и среднесерийного производств, обеспечивающий изготовление изделий путем укладки стекло-, органо-, углежгутов по нелинейной программе на вращающуюся оправку цилиндрической, конусно-цилиндрической, шарообразной форм диаметром до 1000 мм и длиной до 2500 мм.

На рис. 1.9 показан трехшпиндельный станок рамного типа.



Рисунок. 1.9. Трехшпиндельный намоточный станок рамного типа

Благодаря развитию науки и техники появились возможности оснащения намоточных станков ЧПУ с большой памятью и высоким быстродействием, эффективными средствами адаптации, системами активного контроля, а это в свою очередь может позволить реализовать те алгоритмы, которые раньше считались нереализуемыми. К их числу можно отнести алгоритмы, созданные с применением методов трехмерного твердотельного моделирования и контроля процессов изготовления деталей на основе систем технического зрения (СТЗ).

В связи с вышесказанным, проблемы, связанные с разработкой и внедрением системы автоматизированного проектирования намоточных станков, рассматриваемые в диссертационной работе Аюшева Т.В. [5] актуальны и требуют создания новых методов и алгоритмов трехмерного моделирования

процессов формообразования оболочек, контроля их параметров, а также принципиально усовершенствованной технологии намотки [70].

Специалисты фирмы «Локхид» утверждают, что изготовление интегральных конструкций из композиционных материалов (намотка, выкладка, прессование, автоклавное отверждение) сводит к минимуму производственные затраты за счет сокращения на 65 % количества требуемых деталей, на 81 % числа сборочных операций, на 29 % трудоемкости изготовления и на 87 % необходимого крупногабаритного оборудования при значительном повышении коэффициента использования материала [115, 121].

На практике, наиболее распространенными схемами намоточных станков являются четырехкоординатные ($\pm x, \pm y, \pm z, \pm u$ 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. Анализируя современные направления в развитии метода намотки, следует отметить, что деятельность большинства мировых производителей оборудования сконцентрировалась в двух направлениях: [14,15,16]

- разработка универсальных станков с измененной геометрией рабочей зоны и максимальным оснащением станков дополнительными средствами намотки и раскладываемыми головками;

- разработка специальных станков для изготовления изделий определенной геометрии и размеров.

Для обеспечения работы намоточного станка любой конфигурации принципиальным остается выбор схемы пропитки связующим наматываемых нитей и их натяжение.

В настоящее время известны многочисленные способы пропитки связующим волоконного материала [16]. Среди данных способов, наиболее распространены способы и устройства, в которых для создания давления пропитки связующим используются различного рода барабаны и ролики с различной их модификацией (рис. 1.10).

Известны примеры создания пропиточных устройств с использованием способов создания гидравлического напора на слив самим связующим или когда пропитка нитей производится одновременным созданием градиента давления и вакуумированием, но такие устройства громоздки и не технологичны.

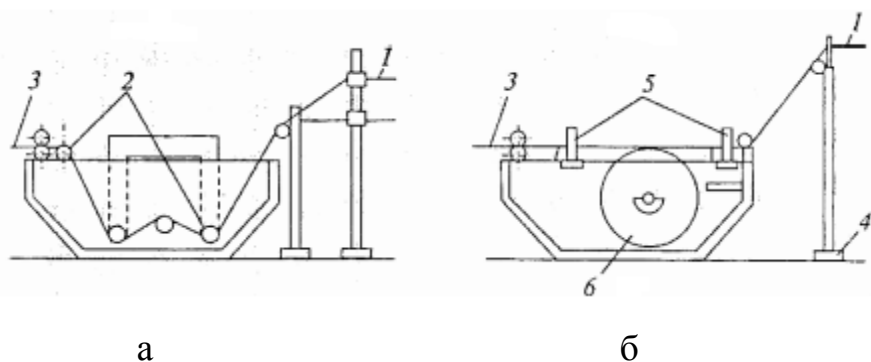


Рисунок 1.10. Способы пропитки волокнистого наполнителя

а - пропитка окунанием нити; б – пропитка на вращающемся барабане.

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

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 [16].

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 нитей (шпулярниками).

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

При реализации метода намотки, как правило [89], 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 намотаны 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 [92].

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.

1.3. Анализ волокнистых наполнителей и связующего, используемого в технологическом процессе намотки

Свойства наматываемого композитного слоя зависят от его структуры, типа связующего, армирующего (волокнистого) материала и наполнителей [37]. Возможность выбора этих компонентов и варьирования их соотношений

позволяют подбирать композицию для получения любого слоя малогабаритного корпуса с любыми эксплуатационными свойствами.

Наиболее распространенными волокнистыми наполнителями в составе композитного полимерного материала используемого для намотки являются стекловолокно, органическое волокно и углеволокно как в нитях, так и жгутах [10].

Рассмотрим свойства волокон более подробно и их использование.

Стекловолокнистые армирующие наполнители. Свойства стекловолокон определяются, в первую очередь, составом стекла. Стеклоянное волокно является наиболее распространенным материалом, используемым в качестве армирующего наполнителя. Стекло E – конструкции, требующие невысокой упругости и усталостной прочности. Стекло S – легковесные конструкции, выдерживающие большие нагрузки. Основной причиной такого широкого диапазона значений основных характеристик стеклонитей является наличие дефектов в волокнах и влияние на них атмосферной влаги.

Рассмотренные свойства стеклянных волокон – их высокая прочность и жесткость, высокие температуры размягчения и неподверженность гниению, а также их низкая стоимость ставит их в число лучших наполнителей пластиков конструкционного назначения [32].

Арамидоволокнистые армирующие наполнители. Арамидные нити среди всех органических волокон имеют наиболее высокие эксплуатационные характеристики [35,-68]. Они отличаются устойчивостью к воздействию пламени, высоких температур, органических растворителей, нефтепродуктов и т.п. Kevlar, ЖСВМ, Армос – высокая прочность, умеренная жесткость и хорошее сопротивление ударному нагружению, очень низкая прочность при сжатии.

Арамидные волокна менее хрупкие по сравнению с углеродными и стеклянными волокнами. Несмотря на ряд положительных свойств у арамидного волокна присутствуют недостатки: высокая цена, влагопоглощение и старение.

Углеволокнистые армирующие наполнители. В настоящее время прослеживается явная тенденция к использованию углеродных волокон для

высоконагруженных корпусов. Такой интерес вызван наличием у этих волокон комплекса свойств, которые превышают параметры стеклянных волокон – высокая прочность и модуль упругости при растяжении и изгибе, малая плотность, высокая электропроводность, низкие коэффициенты трения и термического расширения [49, 105].

Углеродные волокна различаются как высокопрочные – высокая прочность и умеренная жесткость и высокомодульные – очень высокая жесткость и умеренная прочность.

Однако, серьезными недостатками композитов на основе высокомодульных углеродных волокон является малая межслоевая прочность при сдвиге, не превышающая 14-28 МПа и низкая ударная вязкость.

При намотке, когда углеродные волокна проходят через натяжные устройства, они "пылят", что приводит к выходу из строя электрических и электронных блоков намоточных станков.

А так же для достижения в углепластике высоких удельных характеристик в процессе полимеризации требуется создавать внешнее давление 0,4...0,6 МПа, т.е. необходимо дополнительное технологическое решение.

В таблице 1.1 представлены свойства армирующих материалов, используемых в промышленности [35].

Выбор связующего для композита - сложная задача, правильное решение которой способствует созданию материала с эффективными технологическими и эксплуатационными свойствами, что особенно важно при изготовлении оболочки малогабаритных корпусов.

В качестве матричных материалов (связующих) полимерных композитов используют термопластичные и термореактивные связующие [49].

Термопластичные связующие представляют собой линейные полимеры, перерабатываемые выше их температуры плавления (температуры перехода в вязкотекучее состояние). Термореактивные связующие - низковязкие, легкорастворимые продукты (смолы), способные отверждаться при нагреве под действием отвердителей, катализаторов с образованием после отверждения

необратимой сетчатой структуры (нерастворимой и неплавкой).

Таблица 1.1. свойства армирующих материалов, используемых в промышленности

Показатель	Стекловолокна		Углеволокна			Органоволокна	
	E	S	в/м	н/м	в/п	Кевла p	СВМ
Плотность, (г/см ³)	2,54	2,49	1,9	1,9	1,7	1,45	1,45
Предел прочности, (ГПа)	3,5	4,6	1,8	2,5	4,0	3,5	4,0
Модуль Юнга (продольный), (ГПа)	73,5	86,5	420	240	260	124	120
Предельное удлинение, (%)	4,7	5,3	0,5	1,0	–	2	2
Коэффициент Пуассона	0,25	–	0,39	–	–	0,3	–
Диам. элементарн. волокна, (мкм)	10	10	7-8	7-8	7-8	6	6
Удельная прочность (10 ⁻¹ , км)	13,7	18,6	9,47	13,1	23,5	24,1	27,5
Удельная жесткость, (10 ⁻³ , км)	2,7	3,5	22,1	12,6	15,3	8,5	8,3

Терморреактивные связующие придают материалу монолитность, способствуют эффективному использованию механических свойств волокна и равномерному распределению усилий между волокнами, защищают волокно от химических, атмосферных и других внешних воздействий, а также сами воспринимают часть усилий, развивающихся в материале при работе под нагрузкой. В их состав помимо смолы или смесей смол могут входить активные или неактивные разбавители, инициаторы и ускорители отверждения, различные минеральные и органические добавки, ингибиторы, красители, пигменты и другие ингредиенты.

В промышленности стеклопластиков применяют, главным образом, терморреактивные эпоксидные и полиэфирные смолы [40,46].

Характеристики основных терморреактивных связующих применяемых для стеклопластика представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Свойства терморепактивных связующих

Связующее	Фенолоформальдегидное	Эпоксидное	Полиэфирное, общего назначения
Плотность, кг/м ³	1330-1570	1200-1900	1100-1460
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	-	50-450	40-90
Растяжение, %	-	-	5
Теплостойкость, °С	260	80-200	121
Адгезионная прочность в системе стекловолоконно-связующее, МПа	20-22,5	28-42	7-9
Усадка при отверждении, %	6-7	2-3	5-8
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, град ⁻¹	75	60	83

Эпоксидные связующие. Эпоксидные смолы представляют собой смесь олигомерных продуктов с эпоксидными группами на концах звеньев. Эпоксидные связующие обладают хорошей адгезией к различным волокнам, могут длительное время находиться в недоотвержденном состоянии, что позволяет изготавливать на их основе предварительно пропитанные и частично отвержденные полуфабрикаты (препреги). Модифицированные эпоксидные связующие имеют повышенную теплостойкость с работоспособностью при температуре до 200°С.

Эпоксидные смолы являются одними из лучших видов связующих для большого числа волокнистых композитов [40]. Эпоксидные смолы могут наноситься либо способом «мокрой намотки», либо намотки предварительно пропитанной нити. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки.

Содержание наполнителя является важнейшим фактором, влияющим на прочность композита. А так как основную нагрузку несёт арматура, то с увеличением её объёмной доли прочность и жёсткость материала растут. Из этого, однако, не следует, что содержание арматуры должно стремиться к теоретическому пределу, который составляет для однонаправленно

армированного композита примерно 90% по объёму. Оптимальное значение этого показателя зависит от используемых компонентов, вида нагружения и условий эксплуатации [98]. Так в работе [99] проведённые исследования на органических нитях показали, что с увеличением объёмного содержания волокон в высокомодульных материалах (ВКМ) прочность композита возрастает, а реализация прочности волокон в нём падает. В процессе намотки толстостенных изделий происходит выдавливание связующего в верхние слои [100-101], что приводит к неполной реализации прочности волокон, поэтому был предложен метод послойного отверждения [106].

В то же время существуют работы [107-108], показывающие, что матрица вообще не влияет на прочность органических нитей, т.к. прочность матрицы всегда выше, чем трансверсальная прочность нитей, и поэтому разрушение происходит по волокнам, а матрица несёт только функцию формообразования.

Анализ значений прочности намотанных изделий из ВКМ, приведённых в работе [109] показывает, что исходная прочность АМ в ракетных твёрдотопливных двигателях в наименьшей степени реализуется в органопластиках по сравнению со стекло – и углепластиками. Так, коэффициент реализации для стеклопластиков составляет 0,85...0,95, углепластиков 0,75...0,95, а для органопластиков 0,65...0,85. Кроме того, отсутствие литературных данных по несущей способности оболочек малого диаметра привело к необходимости выделить для исследования именно этот класс оболочек, изготовленных из органопластика.

В последние десятилетия проявляется интерес к улучшению физико-механических характеристик ПКМ путём введения модификаций связующего (эпоксидной смолы) наноразмерными частицами различной природы.

Объём мирового рынка нанотехнологий по прогнозам Еврокомиссии к 2015 году достиг 1 трлн. евро, большая часть из них - затраты на технологии авиационно-космического комплекса [56].

Главным открытием конца XX и начала XXI века является синтез наноуглеродных соединений – нанотрубок, астраленов, фуллеренов и поиски наиболее эффективных областей их применения.

Особенностью углеродных наноразмерных трубок является их структура, определяющая высокую активность за счёт свободного обобществлённого заряда и активной поверхности, достигающей $500 \text{ м}^2/\text{г}$.

Важность этого открытия демонстрирует Нобелевская премия 2010 г. в области физики, полученная за открытие одной из структурных модификаций углерода – графенов.

Полученные новые углеродные материалы применяют в различных отраслях - от медицины до строительных материалов. Особенный научный и практический интерес вызывают результаты модификации связующего, используемого при изготовлении волокнистых композитов [57].

Создание композиционных материалов с комбинированным наполнителем является перспективным направлением разработок новых полимерных материалов [117] и для этого необходимо разработать механизм введения наномодификаторов в полимерные композиционные материалы.

1.4 Цель и основные задачи исследования

Из приведенных выше публикаций и краткого анализа некоторых квалификационных работ следует, что в настоящее время с применением разрабатываемых материалов, технологического оборудования в различных системах продолжает стоять вопрос о дальнейшем совершенствовании технологического обеспечения качества производства малогабаритных корпусов из полимерных композиционных материалов.

При проведении анализа существующего технологического обеспечения, установлено, что доминирующими факторами, влияющими на технологическое обеспечение качества производства малогабаритных корпусов, являются:

- используемое оборудование и приспособления для производства композитных корпусов;
- технологические способы и параметры намотки композитных корпусов;
- изменяемые свойства волокнистых наполнителей и связующего в процессе намотки.

Каждая из этих задач, входит в тот или иной технологический процесс, влечет за собой необходимость широких исследований, в силу чего количество таких задач для квалификационной работы данного уровня не может быть большим.

В связи с этим, в результате проведенного анализа диссертационная работа ограничена решением трех основных проблемных задач указанных при литературном анализе. Схема синтеза этих задач показана на рис. 1.11.



Рисунок 1.11. Схема решаемых задач повышения качества производства малогабаритных корпусов

Специфика композитного материала такова, что независимо от того, производится ли оно непосредственно на предприятии или приобретается, перед намоткой малогабаритных корпусов подвергается тем или иным технологическим операциям, в процессе которых изменяются некоторые из его геометрических параметров, а, следовательно, и физико-механические характеристики.

В связи с этим, актуальной представляется задача разработки технологического обеспечения всех требований к связующим и армирующим материалам в тех случаях, когда их характеристики выходят за рамки допустимых значений, вследствие отклонений, подлежащих целенаправленной корректировке в процессе изготовления малогабаритных корпусов. Эта задача должна решаться в рамках экспериментально-теоретического подхода.

Экспериментальная составляющая заключается в изготовлении и испытании оборудования и образцов изделий из композита с целью установления их физико-механических и прочностных характеристик.

Теоретическая составляющая задачи – использование тех или иных зависимостей композитного материала от геометрических параметров намотки с последующей разработкой программы намотки и сопоставления экспериментальных характеристик, полученных изделий с расчетными данными.

Второй задачей повышения качества намотки является повышение максимальной несущей способности за счет изменения структуры намотки в переходных зонах кольцевого и спирального слоев.

Решение этой задачи направлено на выявление рациональной структуры намотки композитного материала на оправку сложной формы, обеспечивающей несущую способность малогабаритного корпуса.

Как и при решении предыдущей задачи за технологическим процессом намотки остается выбор режимов обеспечения рациональной толщины намотки при изменении схемы намотки.

Третья задача связана с проблемой повышения качества, деформационными и прочностными свойствами малогабаритных корпусов из ПКМ путем введения наномодификаторов в связующее, которые обеспечивают снижение дефектности

ПКМ при реализации технологических режимов отверждения композитных корпусов.

Эти выводы позволили сформулировать цель диссертационной работы.

Цель и задачи исследования. Целью данной диссертационной работы является разработка технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных корпусов на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования и наномодификации полимерной матрицы при намотке, повышающее их массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующего технологического обеспечения процесса намотки малогабаритных композитных корпусов.

2. Разработать технологическое оборудование, способ и управляющую программу автоматизированной намотки, повышающих качество производства малогабаритных корпусов из полимерных композитных материалов с использованием расчетных компьютерных систем.

3. Экспериментально определить влияние основных структурно-технологических параметров процесса намотки малогабаритных композитных корпусов на массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

4. Разработать технологический процесс намотки на основе наномодификации полимерной матрицы для повышения качества производства малогабаритных корпусов.

5. Внедрить результаты работы: разработанный технологический процесс, технологическое оборудование и программное обеспечение для намотки малогабаритных корпусов из полимерного материала на производственных предприятиях и в учебном процессе.

РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ, СПОСОБА И ПРОГРАММЫ НАМОТКИ, ПОВЫШАЮЩИХ КАЧЕСТВО ПРОИЗВОДСТВА МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ

2.1. Обоснование технологического процесса намотки малогабаритных корпусов как объекта исследования

Формирование методом автоматизированной намотки изделий из КМ: волокон, нитей, жгутов и лент является в современных условиях наиболее перспективным способом, удовлетворяющим всем технико-экономическим показателям.

Проведенный обзор литературных источников показал отсутствие экспериментальных данных о деформационных свойствах и общего ресурса малогабаритных корпусов. Исходя из этого, для исследования были выбраны малогабаритные корпуса диаметром от 50 до 135 мм, изготовленные намоткой стеклонитями линейной плотностью 102 текс и нитями органическими 58,8 текс.

2.2. Разработка технологического оборудования и оснастки для намотки малогабаритных корпусов

Как было сказано в разделе 1, в промышленности для намотки цилиндрических корпусов, в основном, применяется технологическое оборудование, работающее по принципу токарного станка. В связи с тем, что для намотки малогабаритных оболочек намоточные станки серийно не выпускаются, было разработано и изготовлено оборудование, аналогичное по конструкциям станкам для изготовления крупногабаритных оболочек. Оборудование для намотки оболочечных конструкций должно обеспечивать [86]:

- автоматизацию технологического процесса с целью получения качества формирования при одновременном получении стабильности свойств, изготавливаемых изделий:

-наименьшие сроки технологического обеспечения намотки новых видов изделий;

-простоту в эксплуатации и возможность корректировки технологического процесса изготовления изделий:

-высокое качество производства при изготовлении малогабаритных корпусов.

Для решения вышеперечисленных задач было спроектировано и изготовлено намоточное оборудование, состоящее из намоточного станка, пропиточно-формующего тракта и удлинителя хода раскладчика.

2.2.1. Разработка устройств технологического оборудования, обеспечивающих повышение качества производства малогабаритных корпусов

Для технологического процесса намотки малогабаритных корпусов был переоборудован токарный станок 16А20Ф3С15 со стойкой НЦ-31 и разработана технологическая программа намотки.

Станок для намотки (рис.2.1) токарного типа, состоит из передней (неподвижной) и задней (подвижной) бабок, в люнетах которых устанавливаются концы вала с оправкой, и суппорта с пропиточно-формующим трактом и нитеукладчиком. При этом суппорт, раскладывающий ролик нитеукладчика и ось вращения оправки находятся в одной плоскости-плоскости нитеукладчика [37].

Станок имеет следующие управляющие координаты, перемещение которых осуществляется при помощи трех электродвигателей постоянного тока с электромашинными усилителями типа ЭМУ:

X(W)- возвратно-поступательное перемещение каретки параллельно оси вращения оправки;

У(U)- возвратно-поступательное перемещение суппорта перпендикулярно оси вращения оправки;

Z(G)- поворот оправки вокруг своей оси.



Рисунок 2. 1. Намоточный станок с пультом и шкафом управления

Перед намоткой, в управляющей программе для точной координации исходного положения управляющих органов станка, так называемых «нулевых точек» программы, задается нониус координаты. Цена деления нониуса по координатам $X(W)$, $Y(U)$ - 1 мм, по координате $Z(G)$ - 1° .

Разработка намоточного станка (рис.2.1) с пультом управления станком, шкафом электрического управления пультом, и оригинальных конструкций пропиточно-формующего тракта (рис.2.7), шпулярника (рис. 2.2) и удлинителя хода нитераскладчика (рис.2.8) позволила повысить качество производства малогабаритных корпусов.

Параметр натяжения АМ при изготовлении намотанных изделий - одно из наиболее эффективных технологических факторов регулирования механических свойств композитов. Поэтому при изготовлении шпулярника, особое внимание было уделено узлу создания предварительного натяжения для нити (рис.2.3) и предварительного натяжения для жгута, который показан на рис. 2.4.

Узел создания предварительного натяжения нити (рис.2.3) состоит из оси (1) на которую надеваются 2 штампованные чашки (2), пружины растяжения (3),

гайки (4) и войлочных полос (5) с прорезями закрепленных на уголках с кронштейнами.



Рисунок 2.2. Шпулярник с 64 одновременно сходящими нитями



Рисунок 2.3. Узел создания предварительного натяжения нити

Узел создания предварительного натяжения жгута (рис.2.4) представляет собой алюминиевый цилиндр (1) внутри на оси (2), которого расположено тормозное колесо (3) с регулирующими фторопластовыми вставками (4) и пружинами (5).

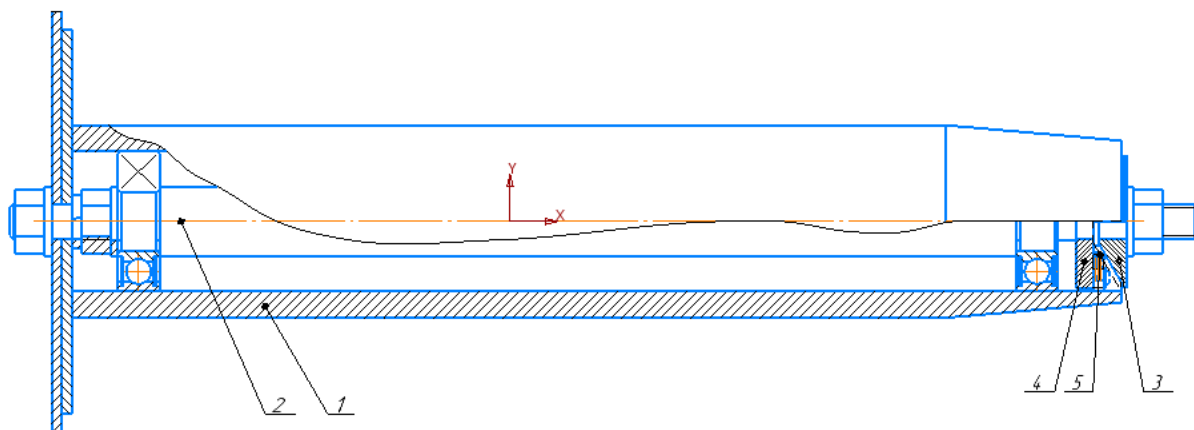


Рисунок 2.4. Узел создания предварительного натяжения жгута

После натяжителя нитей расположен узел нитесборника (рис. 2.5), для формирования ленты из 32 нитей ЕС-7-34х1х3(80) (ГОСТ 8325-93).



Рисунок 2.5. Узел нитесборника

Узел нитесборника представляет собой Г-образный кронштейн с закреплёнными на нём 2-мя латунными фильерами. Нити, проходя через фильеру, формируют ленту, которая поступает в пропиточно-формирующий тракт.

2.2.2. Разработка пропиточно-формиющего тракта с равномерным натяжением армирующего материала

Узел предназначен для пропитки, натяжения и раскладки нитей (жгутов). Узел устанавливается на подвижную платформу, на которой располагаются ванночка для разогрева связующего.

Ванночка размером 400x105x90 мм имеет сварную конструкцию из листа 1,5 (3) мм нижняя часть имеет двойное дно для жидкостной «рубашки». Задняя стенка ванночки имеет отверстие для долива жидкости и отверстие для датчика температуры. К донной поверхности закреплен распределенный нагрев.

Погружной узел представляет пластину (5 мм), на которой размещены два поворотных натяжителя, представляющие поворотную пластину (5 мм) с фиксацией, на которой крепятся два неподвижных валика. Пластина, в свою очередь, крепится к основанию с возможностью поворота, фиксации и простого съема. На пластине размещается направляющий ролик с вертикальной гребенкой из подшипниковых роликов.

Несущим элементом является основание, сваренное из пластин (5 мм). Между основанием и ванночкой укладывается термоизолирующая прокладка.

На основании также размещены: два поворотных натяжителя в подшипниковых узлах с обратной стороны закреплена звездочка (шкив) для возможности управления поворотом программно, три направляющих ролика с вертикальной гребенкой из подшипниковых роликов; две направляющие.

Все детали, на которые может попадать связующее, предпочтительно изготавливать из нержавеющей стали, или со стойким покрытием хромом с зеркальной поверхностью.

Пропиточно-формующий тракт для пропитки длинномерного волоконного материала содержит ванну 1 со смолой, в которую погружен наносный ролик 2, выполненный с кольцевой проточкой под отжимный ролик 3. Боковая поверхность кольцевой проточки наносного ролика 2 соединенная в верхней части с боковой поверхностью отжимного ролика 3. По центру боковой поверхности отжимного ролика 3 выполнена кольцевая проточка, которая образует с наносным роликом 2 канал для прохода длинномерного волоконного материала 4, а отжимный ролик 3 выполнен в форме эксцентрика и установлен с возможностью поворота последнего.

На рис. рис.2.6. изображена принципиальная схема с разрезами А-А и разрезом Б-Б.

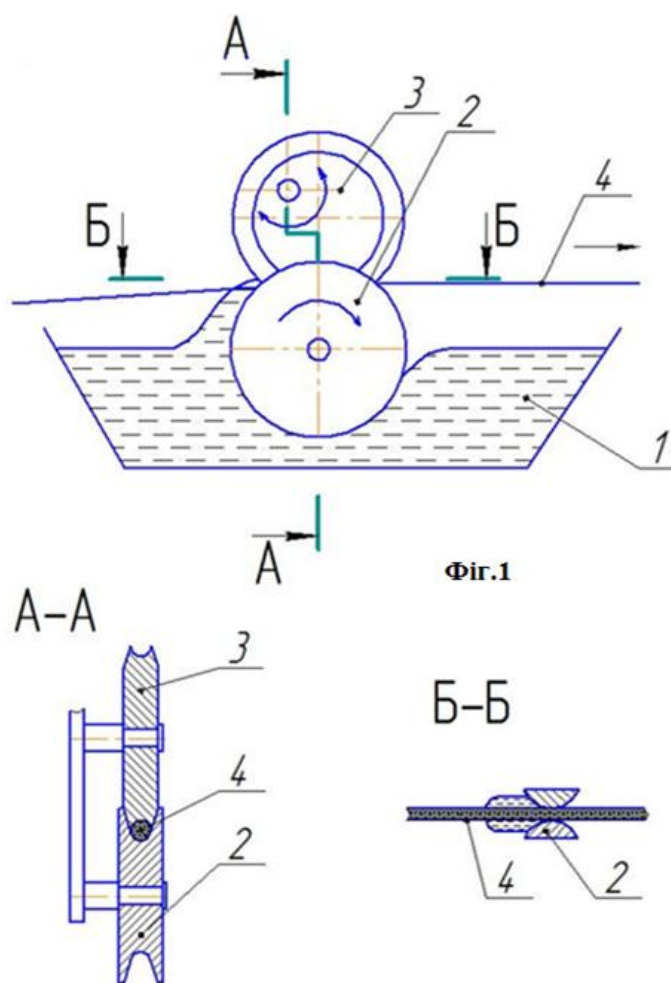


Рисунок 2.6. Принципиальная схема пропиточно-формующего тракта

Устройство для пропитки длинномерного волоконного материала работает следующим образом. Наносной ролик 2 при вращении захватывает смолу из ванны 1, и подает она в зону пропитки длинномерного волоконного материала 4, который имеет узлы. Зона пропитки, в плоскости движения длинномерного волоконного материала 4, имеет форму канала, который сужается, а в поперечном разрезе в точке столкновения - форму круга, диаметр которого определяет количество смолы, которая наносится при движении длинномерного волоконного материала 4. Узел, которой имеет длинномерный волоконный материал 4 попадает в канал, который сужается, где отжимный ролик 3 в форме эксцентрика отклоняется, изменяя размер проходного отверстия между наносным роликом 2 и отжимным роликом 3, давая узлу длинномерного волокононого материала 4, пройти канал между наносным роликом 2 и отжимным роликом 3.

На рис.2.7 показано разработанное действующее устройство пропиточно-формирующего тракта, позволившее за счет исключения разнонапряженности АМ и соблюдения качественной пропитки повысить качество производства малогабаритных корпусов.



Рисунок 2.7. Пропиточно-формирующий тракт натяжения и пропитки нити (жгута)

2.2.3. Разработка удлинителя хода раскладчика армирующего материала

Дальнейшее повышение качества производства малогабаритных композитных корпусов неразрывно связано с увеличением их длины, что влияет на уменьшение съёмных и перестановочных операций в процессе намотки. Увеличение длины намотки малогабаритных корпусов ограничено технологическими возможностями используемого производственного оборудования. Для решения этого вопроса, был сконструирован и изготовлен механизм удлинителя хода раскладчика нити. Механизм свободно устанавливается на переоборудованный станок 16А20Ф3С15 и позволяет укладывать нить на оправку большей длины, чем неподвижная направляющая [4].

Это достигается тем, что в механизме раскладки нити, содержащем цепной транспортер, каретку нитеукладчика, закрепленную на цепи транспортера с возможностью возвратно-поступательного перемещения, и неподвижную направляющую, на приводную каретку, перемещающуюся по неподвижной направляющей намоточного станка, установлен корпус цепного транспортёра, к верхней части цепи которого прикреплена каретка с нитеукладчиком, в к нижней ветви цепи прикреплен неподвижный упор, связанный через неподвижное звено со станиной намоточного станка.

Достижение положительного эффекта при осуществлении данного технического решения подтверждается тем, что устройство для раскладки нити позволяет увеличивать возвратно-поступательное перемещение каретки с нитеукладчиком на имеющемся намоточном станке, даёт возможность изготавливать изделия из АМ «мокрой» намотки большей длины, тем самым расширить ассортимент выпускаемых изделий.

На рис. 2.8 показано устройство для раскладки нити, общий вид, а на рис. 2.9 – кинематическая схема работы данного устройства для раскладки нити с планом перемещений.

Устройство для раскладки нити состоит из каретки 1 с нитеукладчиком 2, корпуса цепного транспортера 5 с цепью 3 и звёздочками 4, неподвижного упора 6, кронштейна 7, звена 8, приводной каретки 9 и неподвижной направляющей 10.

Устройство для раскладки нити выполнено следующим образом.

На неподвижную направляющую 10 намоточного станка установлена приводная каретка 9, к которой при помощи кронштейна 7 крепится корпус цепного транспортера 5, имеющего две звёздочки 4, охватываемые бесконечной цепью 3. К верхней ветви цепи крепится каретка 1 с нитеукладчиком 2, а к нижней ветви цепи 3 крепится неподвижный упор 6, связанный через звено 8 неподвижно со станиной намоточного станка. В пазах корпуса цепного транспортера 5 перемещается каретка 1 с нитеукладчиком 2. Устройство для раскладки нити работает следующим образом.

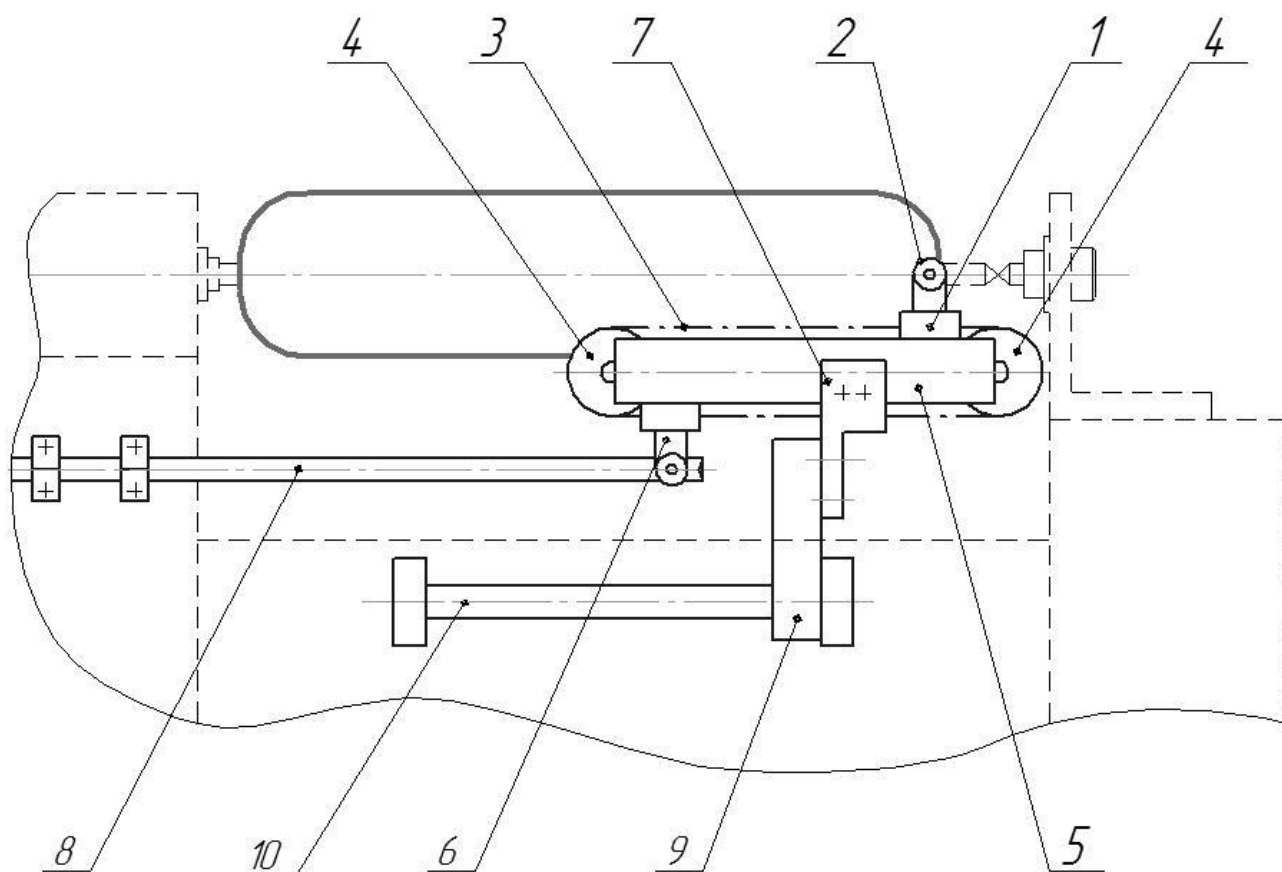


Рисунок 2.8. Удлинитель хода раскладки нити

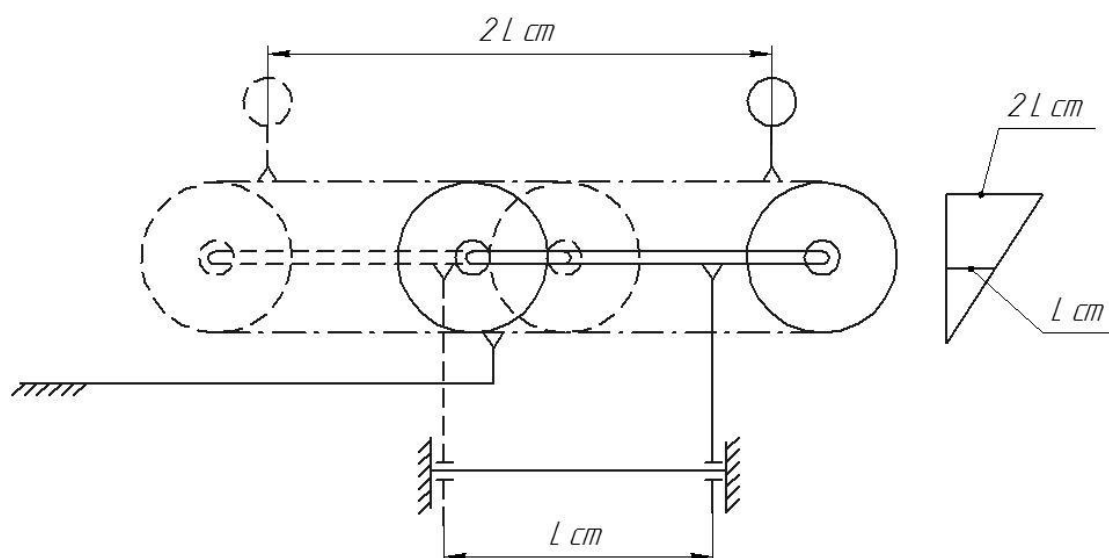


Рисунок 2.9. Кинематическая схема работы устройства

По неподвижной направляющей 10 намоточного станка совместно перемещаются приводная каретка 9 с корпусом цепного транспортера 5 на величину, равную длине неподвижной направляющей 10 намоточного станка, при этом за счет неподвижности упора 6, закрепленного на нижней ветви цепи 3 и связанного через звено 8 неподвижно со станиной намоточного станка, происходит двукратное перемещение каретки 1 с нитеводителем 2 по направляющим пазам, выполненным в корпусе цепного транспортера.

Из приведенной кинематической схемы работы устройства для раскладки нити видно, что при возвратно-поступательном перемещении приводной каретки 9 на длину $L_{ст}$ неподвижной направляющей 10 намоточного станка, каретка 1 с нитеводителем 2 перемещается с помощью цепи 3 по направляющим пазам корпуса цепного транспортера 5 на длину, равную $2L_{ст}$.

К техническим преимуществам предложенного устройства для раскладки нити можно отнести следующие: за счет установки корпуса цепного транспортера на приводную каретку, перемещающуюся по неподвижной направляющей намоточного станка, и неподвижного упора, закрепленного на нижней ветви цепи транспортера, связанного неподвижно через звено со станиной намоточного станка, получаем увеличение хода нитеукладчика, что позволяет расширить

ассортимент выпускаемых изделий из армированного материала методом "мокрой" намотки.

2.3. Разработка способа укладки армирующего материала на сложнопрофильную поверхность оправки

Сложнопрофильная поверхность модели (рис.2.10) представляет собой корпус, состоящий из изотензоридных днищ, цилиндрической и конической частей.

При укладке одного цикла лента армирующего материала (АМ) может вернуться в точку «а» первоначального схода (рис 2.11), при этом объёмная модель повернется на угол $360^{\circ}n$, где $n=0,1,2,3,4\dots$ или лента АМ может вернуться в точку «в», при этом объёмная модель дополнительно повернется (или не повернется) на угол $360 / K$, где $K=1,2,3,4\dots$. Число K определяет порядок симметрии текстурного слоя.

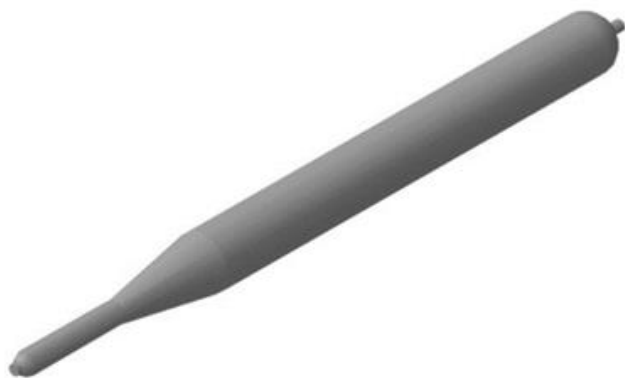


Рисунок 2.10. Объёмная модель оправки малогабаритного корпуса

Порядок симметрии текстурного слоя зависит от диаметра объёмной модели, её длины, угла армирования спирального слоя и угла охвата днища нитью при укладке её по геодезической кривой, т.е.

порядок симметрии - величина произвольная, зависящая от конструктивных размеров наматываемой оболочки.

Особенность формирования текстурного слоя с различным порядком симметрии, выражается в своеобразии получаемой слоистой структуры спирального слоя. При $K=1$ лента, завершив полный цикл обмотки оправки, возвращается в точку своего первоначального схода. Для полной обмотки

поверхности модели число циклов повторяется. При $K=2$ лента, завершив полный цикл, не вернется в исходную точку, и будет сдвинута по отношению к ней на 180° . В исходную точку она вернется, совершив два цикла обмотки, при этом порядок симметрии текстурного слоя показывает, сколько одновременно формируется винтовых текстурных поверхностей.

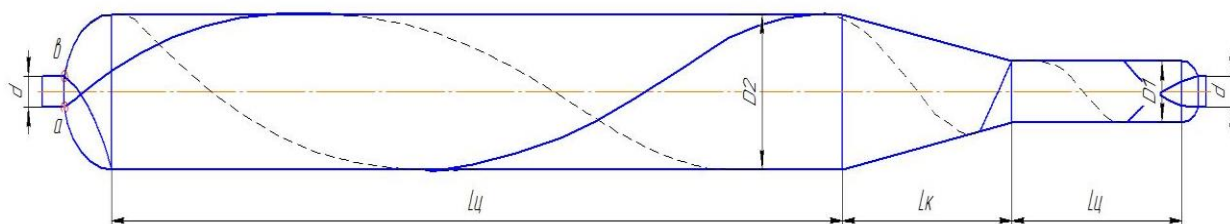


Рисунок 2.11. Траектория укладки ленты армирующего материала

Полный геометрический угол поворота объёмной модели (Φ_r) состоит из угла поворота при укладке по двум днищам (Φ_1 и Φ_2), и угла поворота при укладке по конической (Φ_k) и по цилиндрическим поверхностям ($\Phi_{ц1}$, $\Phi_{ц2}$).

$$\Phi_r = 2(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_k + \Phi_{ц1} + \Phi_{ц2}), \quad (2.1)$$

где

2-коэффициент, учитывающий угол поворота объёмной модели в обратном направлении.

Намоточный угол поворота объёмной модели (Φ_n) из условия равномерной укладки лент по всей поверхности будет [89]:

$$\Phi_n = 360n \pm \frac{360^\circ}{k} \quad (2.2)$$

Погрешность угла поворота, определяемая как $\Delta\Phi = |\Phi_r - \Phi_n|$ распределяется равномерно по участкам объёмной модели. При этом выполняем условие

$$\Phi_n = \Phi_r \pm |\Delta\Phi| \quad (2.3)$$

Если погрешность $|\Delta\Phi|$ представляет величину, измеряемую десятками градусов, то необходимо изменить геометрические размеры объёмной модели и снова просчитать $\Phi_{г}$, последовательно приближаясь к значению $\Phi_{н}$ [90].

2.4. Разработка способа укладки армирующего материала на цилиндрическую и коническую поверхности оправки

Рассматриваем укладку нити по цилиндрической части объёмной модели длиной $l_{ц}$ и углом армирования спирального слоя к образующей φ (рис. 2.18).

При укладке нити от точки «а» к точке «в» объёмная модель повернется на угол

$$\Phi_{ц} = \frac{360^{\circ} l_{ц} \operatorname{tg} \varphi}{\pi D}, \quad (2.4)$$

где

$l_{ц}$ -длина цилиндрической части.

D -диаметр цилиндра.

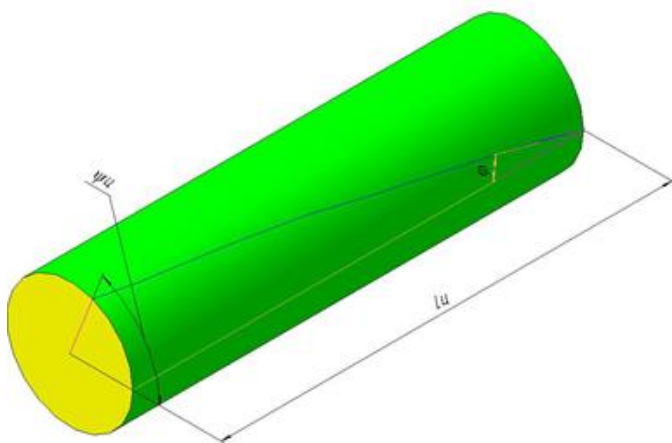


Рисунок 2.12. Схема укладки нити по цилиндрической части объёмной модели

Рассмотрим конус и его развертку с геометрическими размерами, представленными на рис.2.13. При обмотке конической поверхности нить из условия устойчивости должна укладываться по геодезической линии (кривая 1-2, рис. 2.13 а). На развертке конической поверхности эта геодезическая линия представляет собой прямую 1-2 (рис. 2.13 б) уложенную под углом φ_2 к образующей в районе большого диаметра (D) и под углом φ_1 образующей в районе малого диаметра (d).

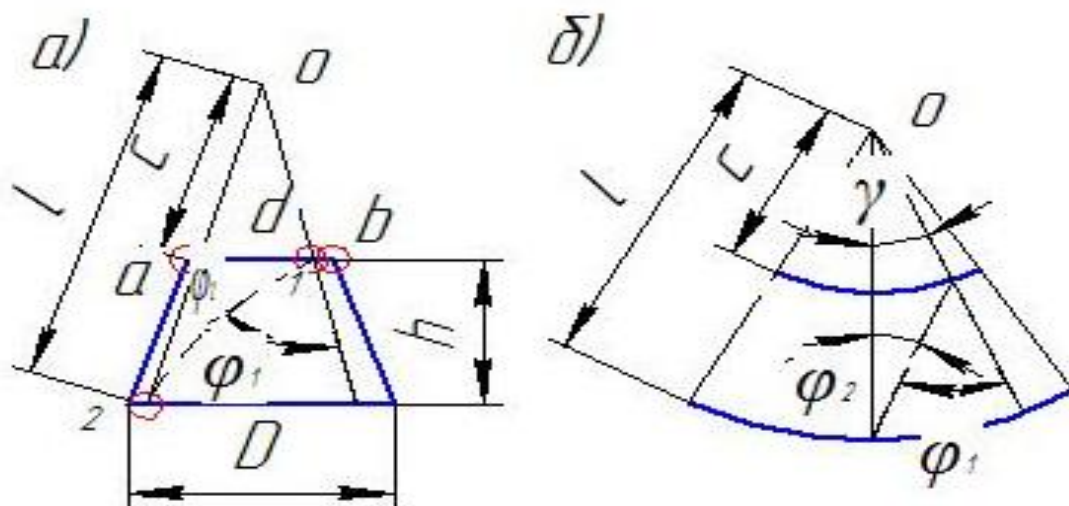


Рисунок 2.13. Схема укладки нити на конической поверхности (штриховая линия - геодезическая траектория)

Рассматривая подобные треугольники (рис. 2.13 б) окончательно получаем равенство (2.5) представляющее собой известную теорему Клеро.

$$\sin\varphi_2 = d/D \sin\varphi_1. \quad (2.5)$$

Угол поворота конуса вокруг оси при укладке нити по его поверхности находим следующим образом. Из геометрического построения рис. 2.13 б получаем:

$$\gamma = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (2.6)$$

Тогда точка окружности основания конуса при укладке нити по поверхности пройдёт путь $L = l\gamma$ при этом конус повернется на угол:

$$\Phi_K = \frac{2 \cdot l \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}{D}. \quad (2.7)$$

Заменив l на более удобное обозначение параметров конической поверхности, получим:

$$\Phi_K = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\sin \cdot \arctg\left(\frac{d_{i+1} - d_i}{2 \cdot h_i}\right)}, \quad (2.8)$$

где

φ_1, φ_2 - входной и выходной углы армирования;

d, D - диаметры оснований усеченного конуса;

h - высота усеченного конуса.

Полученные данные на основе расчета по выше приведенным формулам для линии укладки АМ позволило разработать методику управляющей программы намотки малогабаритных корпусов

2.5. Разработка модели композитного материала для расчета структуры намотки малогабаритных корпусов

Одной из основных моделей композиционных материалов, применяемых для расчета конструкций на прочность и их проектирования, является гетерогенная модель.

Гетерогенная модель композитного материала – основана на представлении материала в виде упорядоченно или случайно расположенных в изотропной матрице изотропных армирующих волокон с их идеализированным взаимодействием (рис. 2.14). При этом волокна, как правило, параллельны друг другу.

Физико-механические характеристики композиционных материалов выражаются через свойства матрицы и волокна, объемное содержание, размер волокон и другие микроструктурные параметры. Эта модель позволяет прогнозировать свойства композиционных материалов по характеристикам составляющих его компонентов.

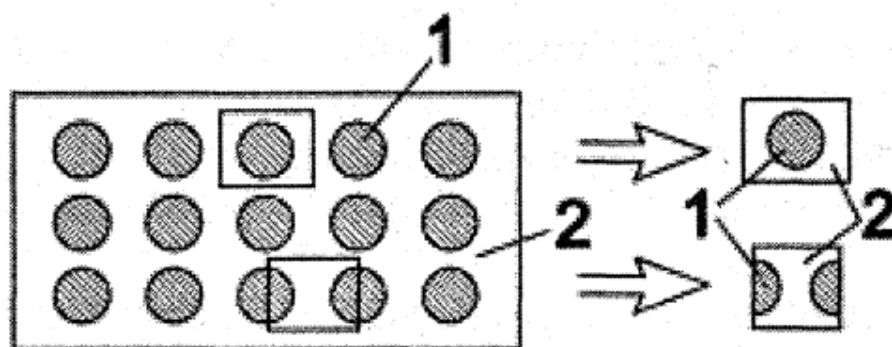


Рисунок 2.14. Гетерогенная модель композиционного материала:

1 - волокно, 2 - матрица.

Поэтому, для расчета однослойного элемента из однонаправленного КМ необходимо знать физико-механические свойства матрицы и волокна и их объемное содержание в КМ.

2.5.1. Обоснование выбора систем координат, обеспечивающих процесс намотки малогабаритных корпусов

Для обоснования выбора системы координат, обеспечивающих процесс намотки малогабаритных корпусов представим однонаправленный КМ как трансверсально изотропное тело с осью симметрии совпадающей с осью Z системы координат (СК) (рис.2.15).

Плоскости XY, в данной модели, характерны свойства изотропной модели материала.

Если анизотропное тело обладает симметрией упругих свойств, то уравнения обобщенного закона Гука для него упрощаются, так как некоторые из коэффициентов оказываются равными нулю, а между другими коэффициентами появляются линейные зависимости [43].

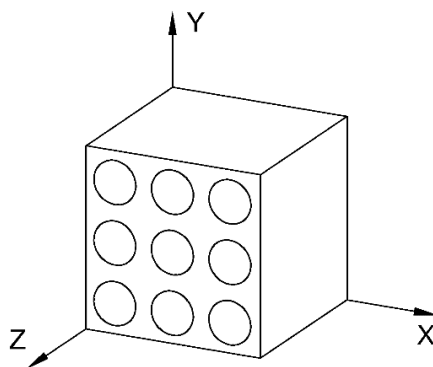


Рисунок 2.15. Модель однонаправленного композитного материала

В технических константах обобщенный закон Гука запишем в виде

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_x} \cdot \sigma_x - \frac{\mu_{yx}}{E_y} \cdot \sigma_y - \frac{\mu_{zx}}{E_z} \cdot \sigma_z, \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_y = -\frac{\mu_{xy}}{E_x} \cdot \sigma_x + \frac{1}{E_y} \cdot \sigma_y - \frac{\mu_{zx}}{E_z} \cdot \sigma_z,$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu_{xz}}{E_x} \cdot \sigma_x - \frac{\mu_{yz}}{E_y} \cdot \sigma_y - \frac{1}{E_z} \cdot \sigma_z,$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \cdot \tau_{xy}, \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G_{yz}} \cdot \tau_{yz}, \quad \gamma_{xz} = \frac{1}{G_{xz}} \cdot \tau_{xz}.$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – линейные относительные деформации;
 E_x, E_y, E_z – модули упругости (Юнга) в направлениях главных осей;
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные напряжения;
 τ_{ij} – касательные напряжения;
 γ_{ij} – относительные сдвиги;
 μ_{ij} – коэффициенты поперечных деформаций (коэффициенты Пуассона) в направлении "j" при нагружении в направлении "i";
 G_{ij} – модули сдвига в плоскости "i, j".

Первый индекс касательного напряжения показывает вдоль какой оси они действуют, а второй - какая из координатных осей является нормалью к данной площадке (τ_{xz} - напряжение, параллельное оси OX на площадке с нормалью OZ).

Тело, обладающее тремя ортогональными плоскостями упругой симметрии в каждой точке, называется ортогонально анизотропным, или ортотропным. Из 12 упругих постоянных, входящих в уравнения (2.9), только девять являются независимыми, так как в силу симметрии матрицы всегда имеют место равенства

$$E_x \cdot \mu_{yx} = E_y \cdot \mu_{xy}, \quad E_y \cdot \mu_{zy} = E_z \cdot \mu_{yz}, \quad E_z \cdot \mu_{xz} = E_x \cdot \mu_{zx}. \quad (2.10)$$

Согласно закону парности касательных напряжений имеем

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}. \quad (2.11)$$

Таким образом, имеют место равенства

$$E_x = E_y, \quad \mu_{yz} = \mu_{xz}, \quad G_{yz} = G_{xz}. \quad (2.12)$$

Таким образом, для расчета элементов с прямолинейной структурой волокна (пластины, продольный слой трубчатого элемента), возможно использование декартовой СК. В свою очередь при расчете элементов, имеющих вдоль волокон цилиндрическую или дугообразную форму (кольцевой слой трубчатого элемента), необходимо использование цилиндрической СК.



Рисунок 2.16. Системы координат, используемые для расчетных компьютерных систем

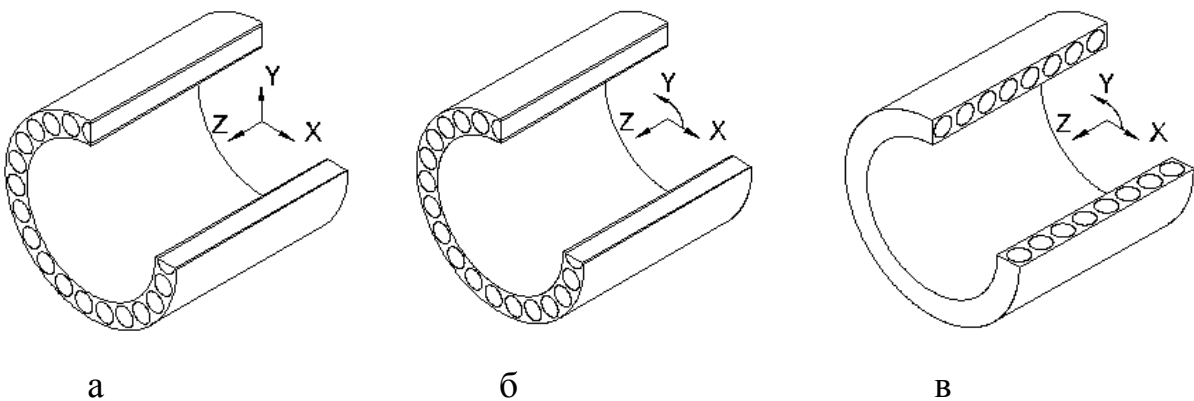


Рисунок 2.17. Направление выкладки слоев в СК

- а - продольный слой в декартовой СК (ось симметрии совпадает с осью Z),
 б - продольный слой в цилиндрической СК (ось симметрии совпадает с осью Z),
 в - кольцевой слой в цилиндрической СК (ось симметрии совпадает с осью Y)

Для расчета сферы либо сферической части элемента (дно баллона высокого давления) используется сферическая СК.

В расчётных компьютерных системах, в частном случае для ANSYS, возможно задание цилиндрической СК лишь для вращения оси Y вокруг оси Z.

Таким образом, в нашем случае, для проектирования элементов трубчатой формы, была выбрана модель КМ с направлением волокон вдоль оси Z для продольного слоя, с использованием декартовой либо цилиндрической СК, и вдоль оси Y (вокруг оси Z) для кольцевого слоя, с использованием цилиндрической СК.

Для продольного слоя возможно использование декартовой либо цилиндрической СК.

При расчете КМ в ANSYS одно из необходимых условий – это определение модели и задание свойств материалу. Для расчета был выбран ортотропный материал. Используя данную модель материала необходимо задать ряд упругих констант: E_x , E_y , E_z - модули упругости; μ_{xy} , μ_{yz} , μ_{xz} - коэффициенты Пуассона; G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} - модули сдвига.

2.5.2. Определение упругих констант композитного материала для моделирования процесса намотки

Традиционно, при изготовлении изделия из КМ, изначально известны упругие константы матрицы и волокна, а также их объемное содержание в КМ. Таким образом, для расчета КМ в ANSYS, необходимо перейти от упругих констант элементов композита к константам композита в целом.

Согласно [22] для однонаправленного композита, в зависимости от направления волокон, упругие константы рассчитываются по определенному закону. Условно принимаем направление вдоль волокон за 1, а поперек – 2.

Модуль упругости вдоль волокон рассчитывается по формуле

$$E_1 = E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta), \quad (2.13)$$

где E_B – модуль упругости волокна;
 Θ – объемное содержание волокна;
 E_M – модуль упругости матрицы.

Модуль упругости поперек волокон рассчитывается по формуле

$$E_2 = \frac{E_B \cdot E_M [E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta)]}{[E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta)] \cdot [E_M \cdot \Theta + E_B \cdot (1 - \Theta)] - \Theta \cdot (1 - \Theta) \cdot (E_B \cdot \mu_M - E_M \cdot \mu_B)^2} \quad (2.14)$$

Коэффициент Пуассона композита при растяжении вдоль волокон находится по формуле

$$\mu_{12} = \mu_B \cdot \Theta + \mu_M \cdot (1 - \Theta), \quad (2.15)$$

где μ_B – коэффициент Пуассона волокна;
 μ_M – коэффициент Пуассона матрицы.

Коэффициент Пуассона композита поперек волокон находится по формуле

$$\mu_{21} = \frac{E_B \cdot E_M \cdot [\mu_B \cdot \Theta + \mu_M \cdot (1 - \Theta)]}{[E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta)] \cdot [E_M \cdot \Theta + E_B \cdot (1 - \Theta)] - \Theta \cdot (1 - \Theta) \cdot (E_B \cdot \mu_M - E_M \cdot \mu_B)^2} \quad (2.16)$$

Модуль сдвига в плоскости со свойствами изотропной модели материала зависит от модуля упругости и коэффициента Пуассона и находится по формуле

$$G_{ij} = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \mu_{ij})}, \quad (2.17)$$

где E_i – модуль упругости в направлении i ;
 μ_{ij} – коэффициент Пуассона в направлении "j" при нагружении в направлении "i".

Модуль упругости на сдвиг является одной из самых противоречивых упругих констант КМ как при ее теоретическом определении, так и в экспериментах, потому что очень сложно реализовать чистый сдвиг в его теоретической

трактовке. По этой причине рассмотрим две модели деформирования элемента КМ при сдвиге (рис. 2.18).

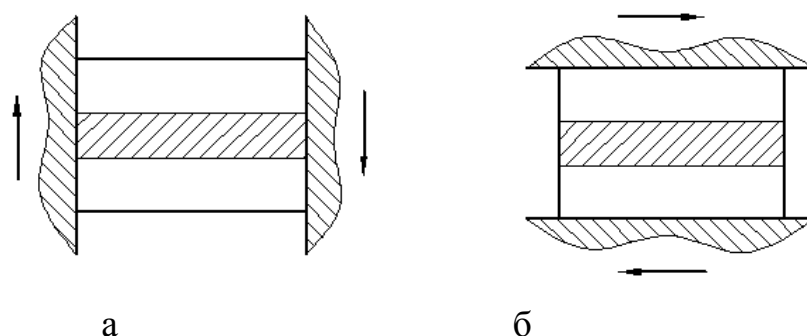


Рисунок 2.18. Деформирование КМ при сдвиге

а - равенство сдвиговых деформаций, б - равенство касательных напряжений.

В первом случае (рис. 2.18, а) сдвиг элемента КМ между двумя жесткими плитами в направлении, перпендикулярном волокнам, обеспечивает равенство сдвиговых деформаций волокна и матрицы. Во втором случае (рис. 2.18, б) сдвиг элемента параллельно волокнам означает, что напряжения в волокне и матрице одинаковы.

Экспериментальные значения модуля сдвига находятся между результатами, полученными в первом и во втором случае [109].

Таким образом, модуль сдвига во всех плоскостях, кроме плоскости со свойствами изотропной модели материала, берется как среднее значение между модулем сдвига рассчитанным исходя из равенства сдвиговых деформаций и модулем сдвига, рассчитанным исходя из равенства касательных напряжений

$$G_{12} = \frac{G_{12}^D + G_{12}^H}{2}, \quad (2.18)$$

где G_{12}^D – модуль сдвига равенства сдвиговых деформаций;

G_{12}^H – модуль сдвига равенства касательных напряжений;

$$G_{12}^D = G_B \cdot \Theta + G_M \cdot (1 - \Theta), \quad (2.19)$$

$$G_{12}^H = \frac{G_B \cdot G_M}{G_M \cdot \Theta + G_B \cdot (1 - \Theta)}, \quad (2.20)$$

где G_B – модуль сдвига волокна;

G_M – модуль сдвига матрицы.

Модули сдвига волокна и матрицы в свою очередь рассчитываются по формулам:

$$G_B = \frac{E_B}{2 \cdot (1 + \mu_B)}, \quad (2.21)$$

$$G_M = \frac{E_M}{2 \cdot (1 + \mu_M)}. \quad (2.22)$$

Таким образом, зная модули упругости и коэффициенты Пуассона волокна и матрицы, а также объемное содержание волокна в КМ, можно рассчитать упругие константы целого слоя из композитного материала.

2.5.3. Расчёт структуры намотки композитного материала, на элементе малогабаритного корпуса

При нагружении трансверсально изотропного тела, в зависимости от направления нагружения по отношению к оси симметрии, коэффициент Пуассона может принимать три различных значения. Осью симметрии в данном случае является ось Z , а плоскостью со свойствами изотропной модели материала - плоскость XY . На рис. 2.19 и 2.20 изображены деформации при нагружении.

Расчеты, описанные в [59, 118] не используют формулы для определения коэффициента Пуассона и соответственно модуля сдвига в поперечном направлении при поперечном нагружении (в плоскости XY). В связи с этим условно принимаем коэффициент Пуассона в плоскости XY равным "0". Модуль сдвига G_{xy} в данном случае находится по формуле (2.18).

Для проверки правильности подхода при выборе методики расчета был рассчитан малогабаритный корпус, условно армированный слоем $[0^\circ]$ и $[90^\circ]$ относительно оси Z .

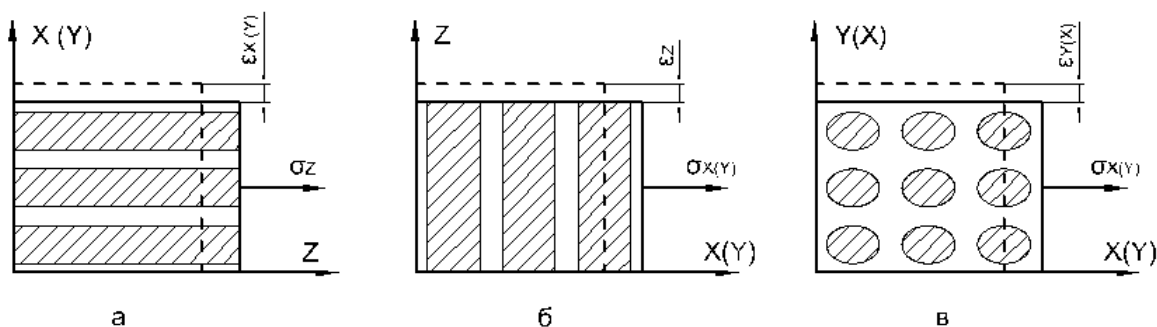


Рисунок 2.19. Деформации слоя при нормальных напряжениях:
 а - поперечная деформация при продольном нагружении; б - продольная деформация при поперечном нагружении; в - поперечная деформация при поперечном нагружении.

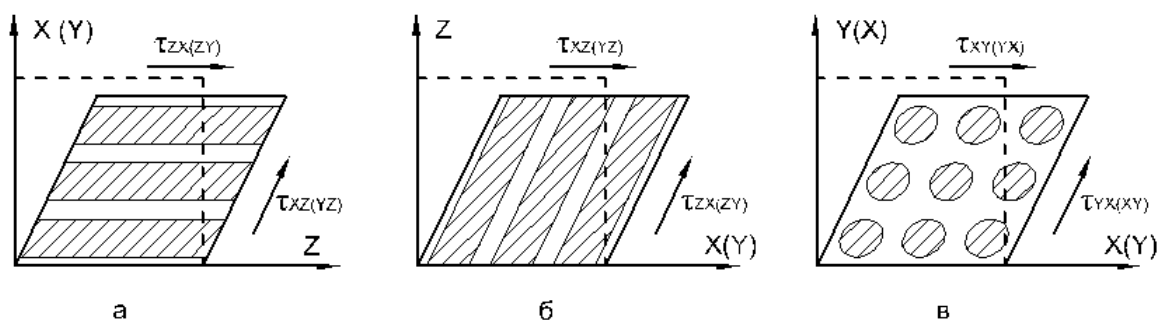


Рисунок 2.20. Деформации слоя при касательных напряжениях:
 а, б - сдвиговая деформация в плоскости параллельной оси симметрии;
 в - сдвиговая деформация в плоскости со свойствами изотропной модели материала.

По деформации стенки малогабаритного корпуса, нагруженного внутренним давлением, был проведен анализ и наглядно показана работа слоев волокон композитного материала.

Геометрические параметры малогабаритного корпуса внутреннего давления представлены на рисунке 2.21.

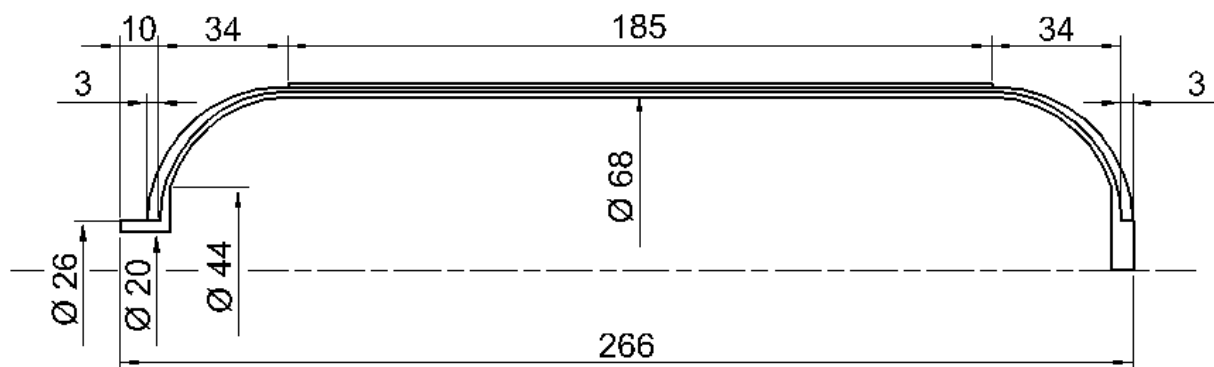


Рисунок 2.21. Геометрические параметры малогабаритного корпуса внутреннего давления

Схема намотки малогабаритного корпуса внутреннего давления представлен на рис. 2.22, а исходные данные по схеме намотки малогабаритного корпуса приведены в таблице 2.1.

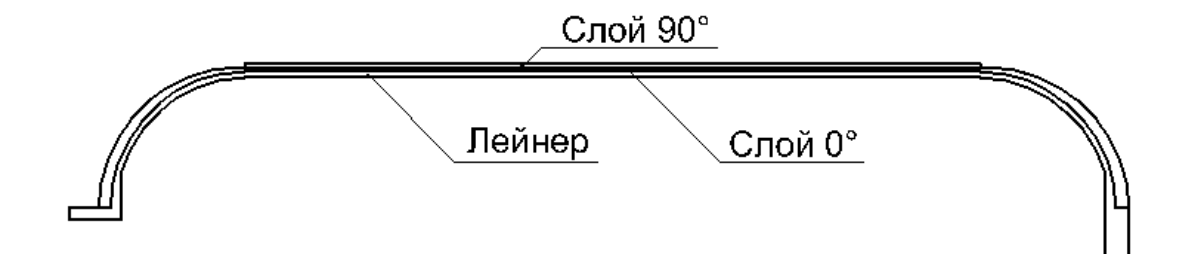


Рисунок 2.22. Схема намотки малогабаритного корпуса

Таблица 2.1. Геометрические параметры малогабаритного корпуса

Параметр	Обозначение	Значение, мм
Толщина лейнера	$h_{л}$	1,5
Толщина слоя 0°	h_0	1
Толщина слоя 90°	h_{90}	1

Лейнер малогабаритного корпуса, выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, упругие константы лейнера и компонентов КМ сведены в таблицах 2.2 и 2.3 соответственно.

Таблица 2.2. Упругие константы лайнера малогабаритного корпуса

Физическая величина	Обозначение	Значение
Модуль упругости, МПа	E	$2,1 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	μ	0,3

Таблица 2.3. Упругие константы компонентов КМ

Параметр	Обозначение	Значение
Модуль упругости волокна, МПа	E_B	90000
Коэффициент Пуассона волокна	μ_B	0,28
Модуль сдвига волокна, МПа	G_B	35156
Модуль упругости матрицы, МПа	E_M	4000
Коэффициент Пуассона матрицы	μ_M	0,3
Модуль сдвига матрицы, МПа	G_M	1538
Объемное содержание волокна в слое	Θ	0,6

Проведя вычисления в программном комплексе ANSYS по вышеизложенным формулам (2.17-2.22), в зависимости от направления армирования, были получены численные значения упругих констант КМ (табл. 2.4) и составлена таблица упругих констант, задаваемых в расчетных компьютерных системах, для продольного и кольцевого слоя КМ соответственно таблица 2.5 и 2.6.

Малогабаритный корпус рассчитан в ANSYS методом конечных элементов. Расчет лайнера проводился в декартовой СК, цилиндрической части слоя $[0^\circ]$ и слой $[90^\circ]$ в цилиндрической СК, а околополюсных частей слоя $[0^\circ]$ в сферических СК.

Таблица 2.4. Упругие константы КМ в зависимости от направления армирования при намотке

Параметр	Обозначение	Значение
Модуль упругости вдоль волокон, МПа	E_1	55600
Модуль упругости поперек волокон, МПа	E_2	10138
Коэффициент Пуассона при нагружении вдоль волокон	μ_{12}	0,288
Коэффициент Пуассона при нагружении поперек волокон	μ_{21}	0,053
Модуль сдвига плоскости со свойствами изотропной модели материала (XY), МПа	G_{XY}	5069
Модуль сдвига плоскости параллельной оси симметрии, МПа	G_{12}	12659

Таблица 2.5. Упругие константы продольного слоя

Физическая величина	Обозначение	Расчетная величина	Значение
Модуль упругости, МПа	E_x	E_2	10138
	E_y		10138
	E_z	E_1	55600
Коэффициент Пуассона	μ_{xy}	–	0
	μ_{yz}	μ_{21}	0,053
	μ_{xz}		0,053
Модуль сдвига, МПа	G_{xy}	G_{xy}	5069
	G_{yz}	G_{12}	12659
	G_{xz}		12659

Таблица 2.6. Упругие константы кольцевого слоя

Физическая величина	Обозначение	Расчетная величина	Значение
Модуль упругости, МПа	E_x	E_2	10138
	E_y	E_1	55600
	E_z	E_2	10138
Коэффициент Пуассона	μ_{xy}	μ_{21}	0,053
	μ_{yz}	μ_{12}	0,288
	μ_{xz}	–	0
Модуль сдвига, МПа	G_{xy}	G_{12}	12659
	G_{yz}		12659
	G_{xz}	G_{xy}	5069

Для вычисления в программном комплексе малогабаритный корпус был автоматически разбит на элементы, тем самым образуя сетку. Расчётная модель малогабаритного корпуса и сетка из 12560 элементов представлены на рисунках 2.23 и 2.24.

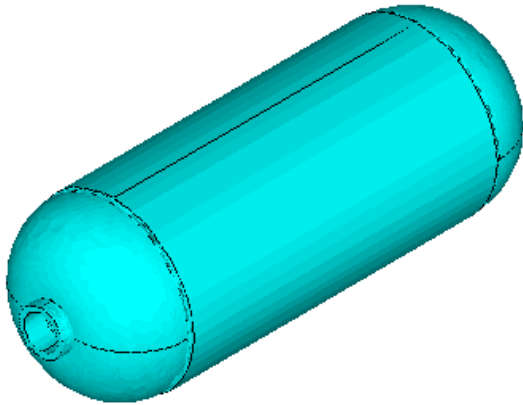


Рисунок 2.23. Модель лайнера малогабаритного корпуса

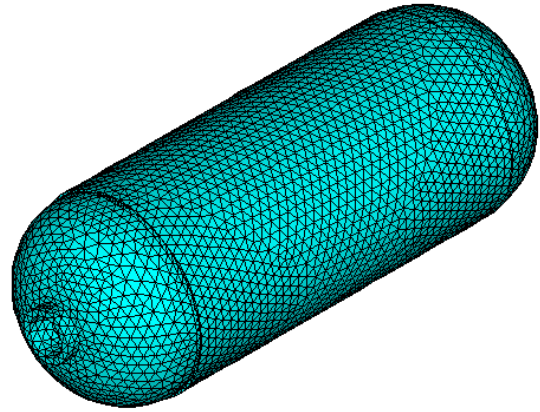


Рисунок 2.24. Расчетная сетка из 12560 элементов

Результаты расчета малогабаритного корпуса, нагруженного внутренним давлением $P_{вн} = 10$ МПа приведены на рисунках 2.25 – 2.28. Для наглядности деформация увеличена в 200 раз. Единица измерения напряжения – МПа.

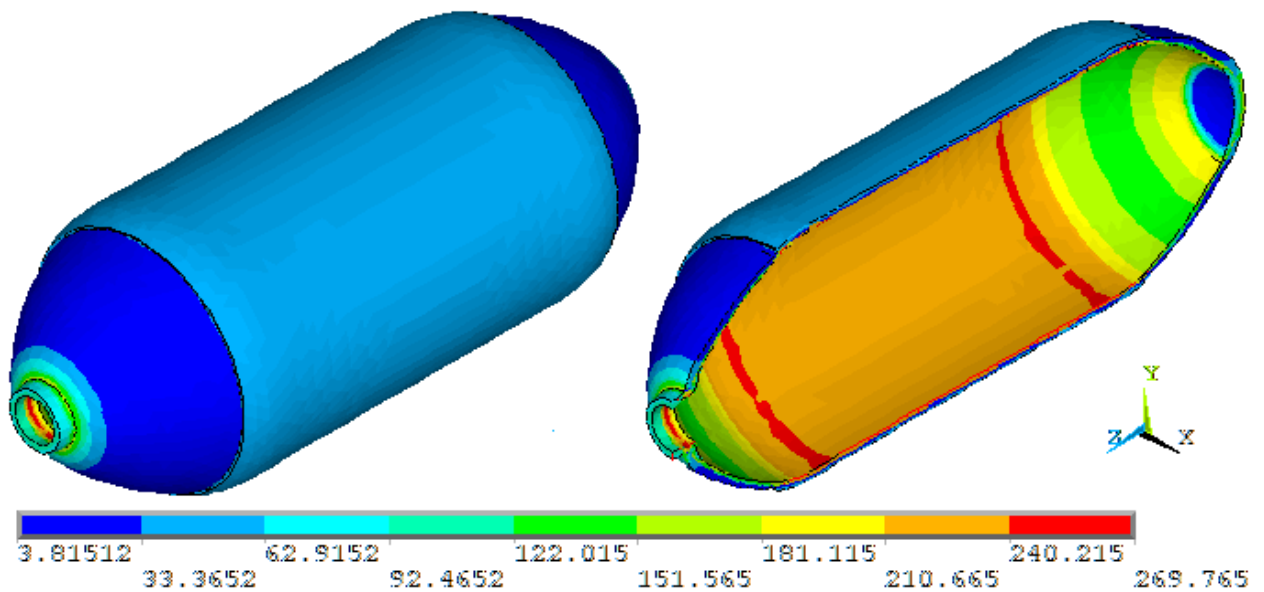


Рисунок 2.25. Эквивалентные напряжения стенки малогабаритного корпуса

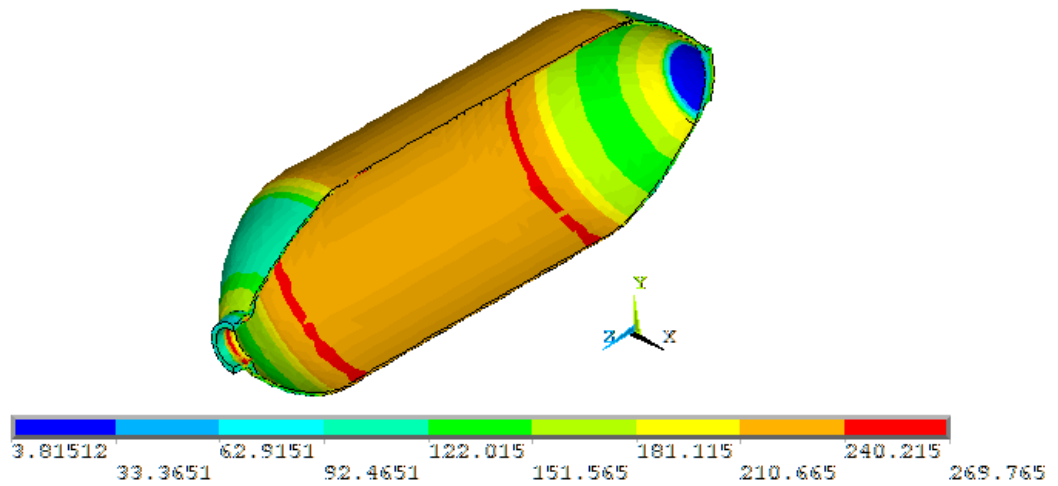


Рисунок 2.26. Эквивалентные напряжения стенки лейнера. Вид в разрезе

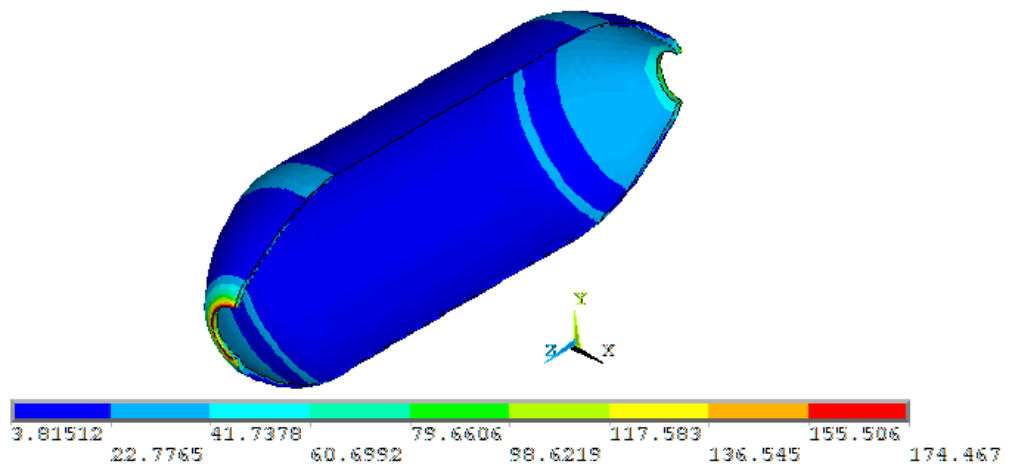


Рисунок 2.27. Эквивалентные напряжения намотанного спирального слоя [0°] КМ.

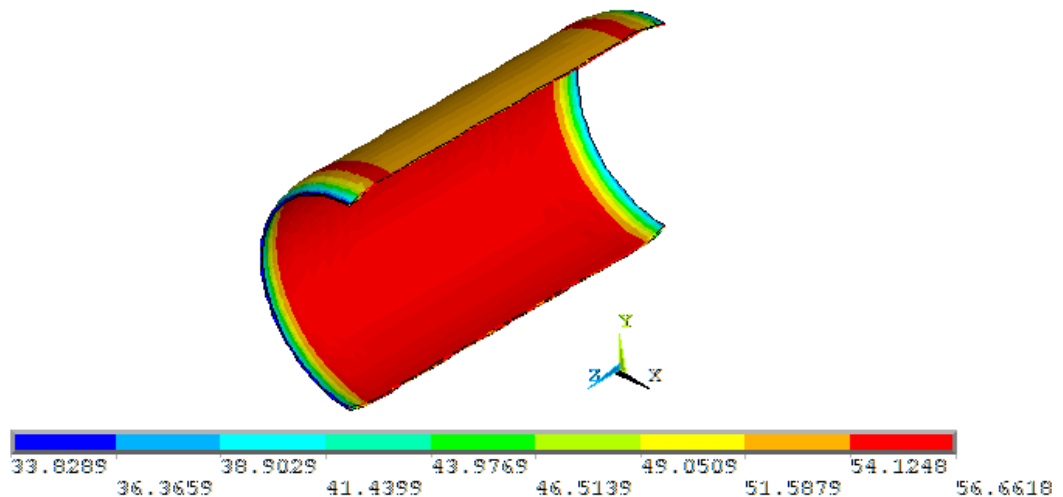


Рисунок 2.28. Эквивалентные напряжения кольцевого слоя [90°] КМ.

После нагружения малогабаритного корпуса внутренним давлением $P_{вн} = 10$ МПа на рис. 2.25-2.28 наглядно видна работа слоев КМ и лейнера. Максимальные

напряжения возникают в лейнере в районе перехода его цилиндрической части в сферическую и составляют 270 МПа. Напряжения в слоях $[0^\circ]$ и $[90^\circ]$ составляют 23 МПа и 57 МПа соответственно.

Исходя из задаваемых допускаемых напряжений слоев КМ и лейнера в расчетном комплексе ANSYS получаем значения структурных параметров используемых для намотки малогабаритного корпуса и которые используются при разработке программы намотки.

2.6. Разработка управляющей технологической программы намотки малогабаритных корпусов

По полученным углам поворота $\Phi_{\text{дн}}$, $\Phi_{\text{к}}$, $\Phi_{\text{ц}}$ наносим геодезическую кривую на поверхность объёмной модели малогабаритного корпуса и рассчитываем управляющую программу.

Проектирование намоточных данных заключается в определении параметров намотки: числа лент спирального слоя, количества слоев спирального слоя, шага намотки кольцевого слоя, количества слоёв кольцевого слоя.

Число лент спирального слоя определяем по соотношению [96]:

$$k_{\text{л}} = \frac{h_{\text{с}} \cdot \pi \cdot \rho \cdot D \cdot \cos \varphi \cdot 10^5}{T \cdot k_{\text{нс}}}, \quad (2.23)$$

где

$h_{\text{с}}$ -толщина АМ в спиральном слое, найденная из условия прочности и долговечности конструкции, см;

φ -угол армирования спирального слоя, град;

T -линейная плотность одной нити, текс;

ρ -массовая плотность АМ, г/см³;

$k_{\text{нс}}$ -количество нитей в ленте спирального слоя;

D -максимальный диаметр изделия, см.

Полученное значение $k_{\text{л}}$ должно быть кратно 2.

Если укладывать k_d в один слой, то возникает разнородность и разноразнонапряженность нитей в ленте, приводящая к снижению конструкционной прочности АМ. Кроме того, при укладке k_d в один слой на полюсах формируется толстый слой АМ. Следовательно, укладку АМ можно разбить на несколько спиральных слоев. В каждом слое ленты АМ должны укладываться таким образом, чтобы на максимальном диаметре изделия ленты ложились встык или с перекрытием. Минимальное число лент в одном слое определяем по соотношению:

$$N_{min} = \frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \cos \varphi}{a}, \quad (2.24)$$

где

a -ширина ленты АМ, см;

2 -коэффициент, учитывающий формирование спирального слоя одновременно лентами в двух направлениях.

Возможное число спиральных слоев при известном количестве лент, определяем по формуле:

$$Z = \frac{k_d}{N_{min}}. \quad (2.25)$$

Полученное значение Z округляем до ближайшего целого числа в сторону уменьшения, и определяем необходимое количество лент АМ в одном слое по формуле:

$$N = \frac{k_d}{Z}. \quad (2.26)$$

Для укладки необходимого числа лент АМ встык на поверхности изделия вычисляется смещение (дополнительный угол поворота) объемной модели.

Угол смещения определяем по формуле:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot U_0}{N \cdot K}, \quad (2.27)$$

где

N -необходимое количество лент армирующего материала в одном слое;

K -порядок симметрии текстурного слоя, определяемого по выражению (2.2), после получения полного угла поворота объемной модели;

2-коэффициент, учитывающий укладку двух лент за один цикл;

U_0 -константа станка равная одному обороту шпинделя, мм.

Шаг укладки АМ в кольцевом слое определяем по соотношению:

$$C = \frac{T \cdot k_{\text{НК}} \cdot 10^{-5}}{h_k \cdot \rho}, \quad (2.28)$$

где

$k_{\text{НК}}$ -количество нитей в ленте кольцевого слоя;

h_k -толщина АМ кольцевого слоя, полученная из условия прочности и долговечности конструкции, см.

Полученное значение шага соответствует укладке АМ в один слой, а для получения укладки нити встык или укладке с малым перекрытием, увеличиваем значение шага до значения ширины АМ (b).

$$C_{\text{одн}} = b, \quad (2.29)$$

$$C = n_{\text{сл}} C_{\text{одн}}, \quad (2.30)$$

где

$C_{\text{одн}}$ - шаг укладки одиночного кольцевого слоя, мм

Проворот одиночного кольцевого слоя определяем по выражению:

$$U = \frac{U_0 \cdot l_{\text{ц}}}{C_{\text{одн}}} \quad (2.31)$$

Таким образом, предлагаемая методика служит теоретической базой для составления управляющей программы намотки на станке с ЧПУ.

2.7. Выводы

1. На основе анализа основных типов намоточного оборудования был переоборудован станок под намотку малогабаритных корпусов, разработаны оригинальные конструкции устройств, защищенные авторскими свидетельствами.

2. Разработанный пропиточно-формующий тракт намоточного станка, обеспечил объёмную пропитку и равномерность нитей в ленте и повысил качество производства малогабаритных корпусов.

3. Разработанный удлинитель хода раскладчика нити, позволил проводить намотку малогабаритных корпусов большей длины и позволил расширить номенклатуру корпусов.

4. Разработанный способ укладки теоретического витка на внешний контур оправки позволило получить траекторию укладки армирующего материала для малогабаритного корпуса сложной формы и определить зоны технологической намотки на каждом геометрическом участке объёмной модели малогабаритного корпуса.

5. Разработанная модель композитного материала позволила обосновать систему координат, обеспечивающую процесс намотки, определить упругие константы композитного материала и провести расчет структуры композитного материала для намотки малогабаритного корпуса.

6. Разработанная управляющая технологическая программа намотки малогабаритных корпусов, позволяет, учитывает основные структурно-технологические параметры: ширину ленты, угол укладки, толщину слоя, шаг укладки.

7. Использование разработанных устройств и способа намотки позволило увеличить совершенство по массе малогабаритных корпусов и увеличить их ресурс.

РАЗДЕЛ 3. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА МАССОВОЕ СОВЕРШЕНСТВО МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ

3.1. Разработка оборудования для проведения экспериментальных исследований малогабаритных корпусов

Для проведения экспериментальных исследований по выявлению влияния основных структурно-технологических параметров на массовое совершенство и повышения качества производства малогабаритных корпусов было разработано и изготовлено: установка для пневматического испытания лейнеров малогабаритных корпусов, установка для гидравлического испытания намотанных малогабаритных корпусов и установка для испытания малогабаритных корпусов на ресурс.

3.1.1. Установка для пневматического испытания малогабаритных корпусов

Установка для пневматического испытания малогабаритных корпусов и лейнеров на герметичность разработана с целью качественного выпуска малогабаритных корпусов. Установка предназначена для испытания малогабаритных корпусов и лейнеров объемом от 0,2 до 7 литров на герметичность давлением до 20 МПа.

Установка состоит из двух отдельных блоков - коллектора с баллонами и стенда для испытаний (рис.3.1).

Коллектор состоит из сварной рамы поз.1 с тремя отсеками для баллонов поз.2, которые замыкаются цепью поз.3. Вентили баллонов при помощи переходников подсоединяются к трубопроводу высокого давления поз.4. На выходе трубопровода расположен вентиль поз.5 ($P_{\text{раб}} = 20 \text{ МПа}$) и манометр поз.6

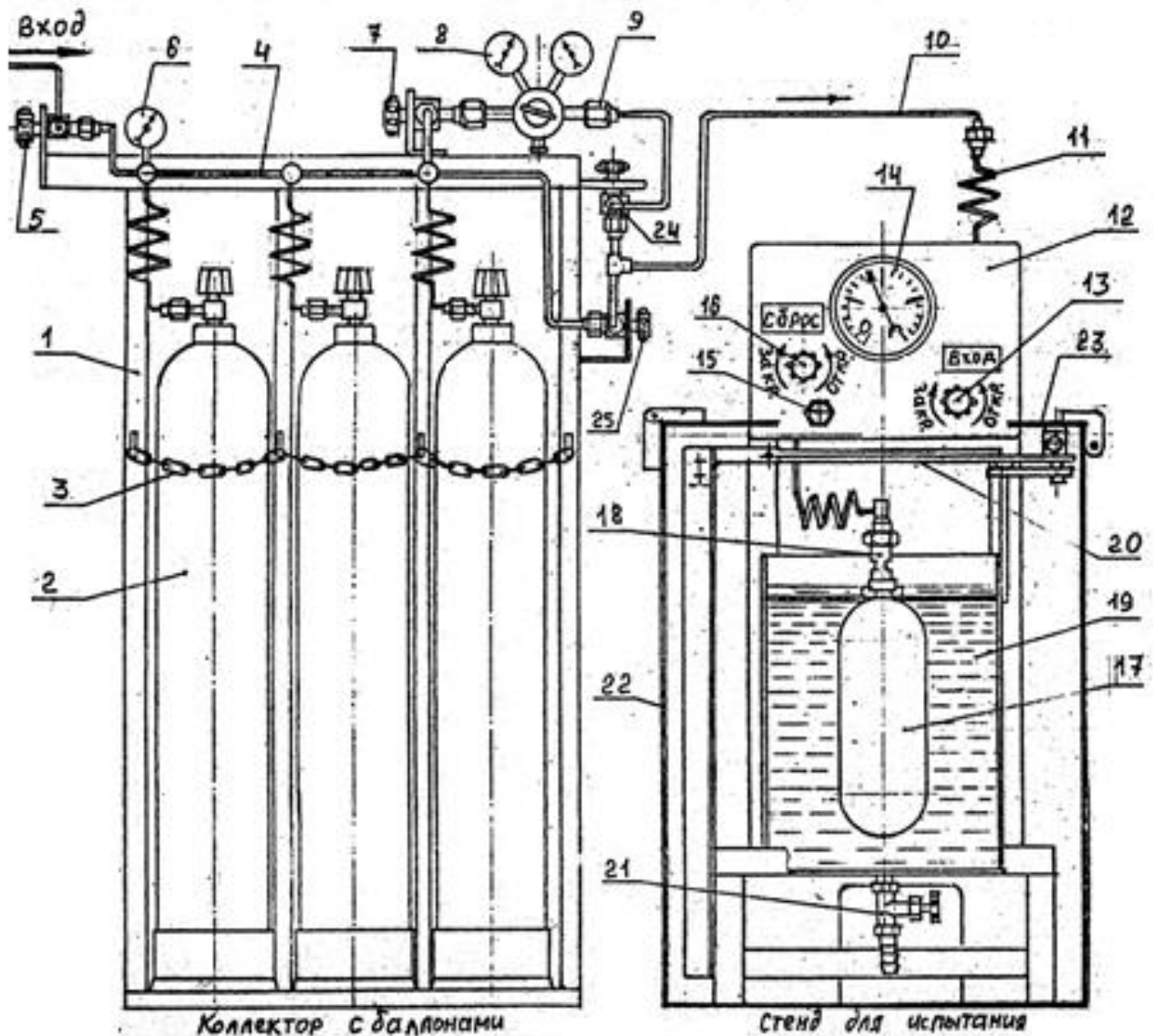


Рисунок 3.1. Установка для пневматического испытания баллонов

1-Рама. 2- Баллон 30л, 3-Цепь, 4-Трубопровод, 5- Вентиль, 6-Манометр ($P_{\max}=30$ МПа), 7-Вентиль, 8-Редуктор ($P_{\text{пн}}=5$ МПа), 9-Гайка накидная, 10- Трубопровод, 11-Переходник, 12-Панель управления, 13-Вентиль входной, 14- Манометр ($P_{\max}=30$ МПа), 15-Клапан предохранительный, 16-Вентиль сброса, 17- Испытуемый малогабаритный корпус, 18-Переходник, 19-Емкость с водой, 20- Люк смотровой, 21-Кран сливной, 22-Бокс, 23-Крышка, 24-Вентиль блокирующий, 25-Вентиль.

($P_{\max} = 30$ МПа). На выходе коллектора расположен вентиль поз.7. К нему подсоединяется редуктор поз.8 ($P_{\text{пн}} = 5$ МПа). При помощи накидной гайки поз.9 к редуктору подсоединен вентиль поз.24; при помощи тройника к этому вентилю подсоединен вентиль поз.25 и трубопровод поз. 10.

Стенд для испытания подсоединяется к трубопроводу поз. 10 с помощью переходника поз.11, который соединен с панелью управления поз. 12, на которой расположен входной вентиль поз. 13, манометр поз. 14 ($P_{\max} = 30$ МПа), предохранительный клапан поз. 15 и вентиль сброса поз. 16.

Панель управления соединена с испытываемым баллоном (лейнером) поз. 17 при помощи переходника поз. 18. Баллон (лейнер) погружен в емкость с водой поз. 19, которая закрывается на замок смотровым люком поз.20, кран поз.21 служит для слива воды.

С целью безопасности испытаний емкость с водой заключена в бронированный бокс поз.22, закрываемый крышкой поз.23.

Порядок испытания лейнера заключается в следующих операциях.

Наполнить емкость водой поз. 19 стенда до уровня кронштейна для крепления лейнера. Проверить, чтобы вентиль поз. 25 был закрыт на панели управления поз. 12 вентили входа поз. 13 и сброса поз. 16 также были закрыты. Погрузить в емкость с водой и установить на кронштейн, испытываемый лейнер поз. 17. Ввернуть в лейнер переходник поз. 18 и при помощи накидной гайки подсоединить к панели управления. На коллекторе с баллонами закрыть вентиль поз.7 на входе редуктора. Вентиль поз.25 также должен быть закрыт. Открыть вентили рабочих баллонов, открыть входной вентиль поз.5 и начать зарядку баллонов поз.2. Следить за подъемом давления по манометру поз.6, при достижении давления 15 МПа, закрыть входной вентиль поз.5. Открыть запорный вентиль поз.7 на редукторе поз.8. Открыть блокирующий вентиль поз.24. Открыть вентиль входа поз. 13 на панели управления. Следить за подъемом давления по манометру поз. 14. При совпадении стрелки манометра поз. 14 с красной меткой, закрыть вентиль входа поз. 13. Сделать выдержку 1 минуту, открыть крышку бокса поз.23 и через иллюминатор поз.20 наблюдать за возможным выделением

пузырьков воздуха. Лейнер считается выдержавшим испытание, если не наблюдается понижения давления по манометру и выделение пузырьков воздуха. Закрывать входной вентиль поз. 13 на панели управления. Вентилем сброса поз. 16 сбросить давление в лейнере. Снять лейнер и высушить.

3.1.2. Установка для гидравлического испытания малогабаритных корпусов

Установка для гидравлического испытания малогабаритных корпусов на прочность разработана с целью качественного выпуска малогабаритных корпусов.

Установка предназначена для испытания малогабаритных корпусов объемом до 7 литров на прочность и герметичность гидравлическим давлением до 50 МПа. Установка может быть использована для испытания малолитражных баллонов на разрушение, как источник первичного давления для гидроусилителя. Установка спроектирована в 2-х вариантах; 1-й вариант для одновременного испытания 9 малогабаритных корпусов, 2-й вариант для испытания 18 малогабаритных корпусов. Отличие 1-го и 2-го вариантов состоит от вместимости коллекторов. Силовые насосные агрегаты одинаковые.

Установка состоит из двух отдельных блоков - силового насосного агрегата и коллектора для подсоединения баллонов (рис.3.2). Силовой насосный агрегат монтируется на сварной раме поз.1, на которой закреплен электродвигатель $N = 3$ кВт, $n = 1500$ об/мин, который соединен с червячным редуктором поз. 3 при помощи упругой муфты поз.5. Редуктор имеет передаточное число $i = 40$. На выходном валу редуктора закреплены две планшайбы поз.6 с кривошипным механизмом для передачи возвратно-поступательного движения на штока насосов поз.7.

На корпусе редуктора закреплены насосы поз.7 и бачок с водой поз.8.

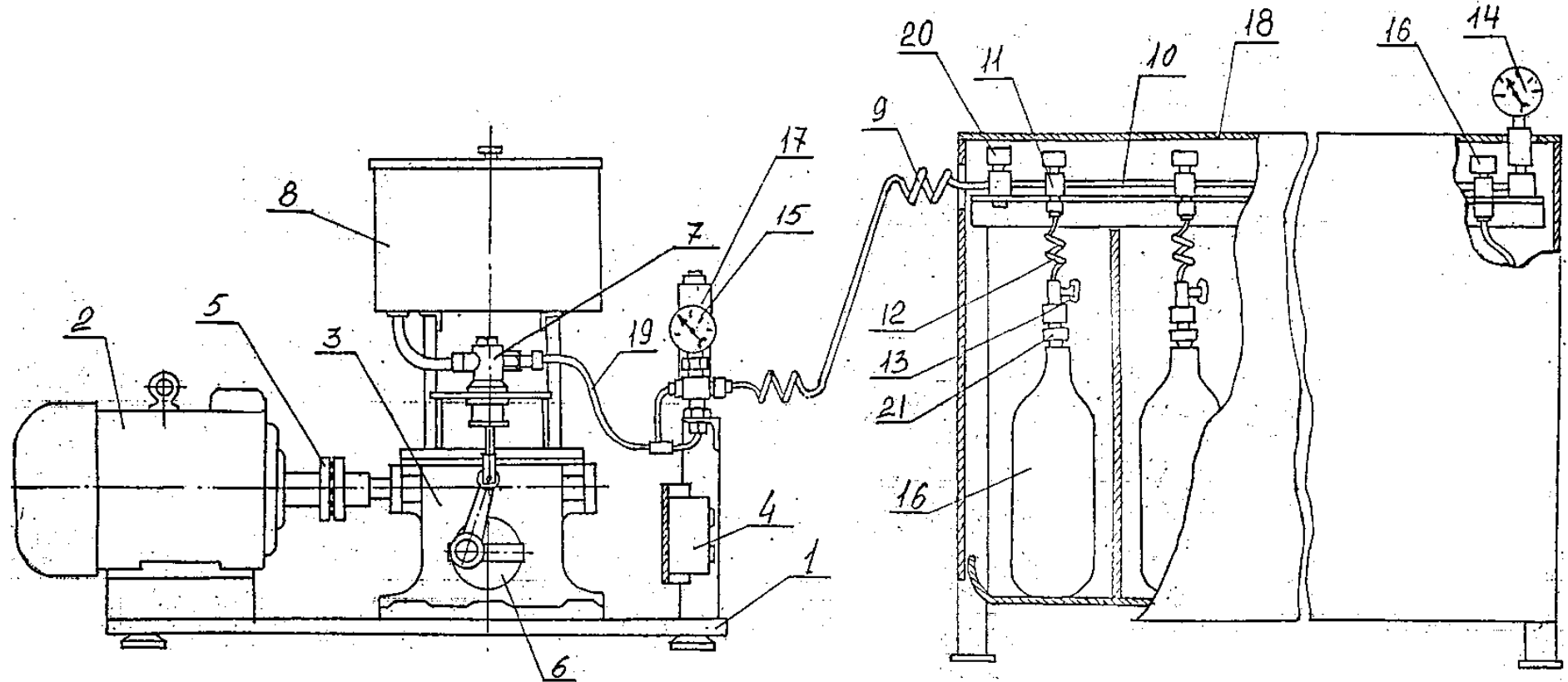


Рисунок 3.2. Установка для гидравлического испытания баллонов

1- Рама сварная, 2- электродвигатель, 3- редуктор червячный, 4- выключатель пакетный, 5- муфта упругая, 6- планшайба, 7- насос, 8- бачок с водой, 9- трубка соединительная, 10- коллектор, 11,16,20- вентили, 12- трубка, 13- винт разгрузочный, 14,15- манометры, 17- клапан предохранительный, 18- кожух защитный, 19- трубка нагнетающая, 21- переходник.

Насосы поз.7 представляют собой цилиндры с плунжерами \varnothing 14 мм и поршнем из фторопласта, в корпусе насосов вставлены впускные и выпускные клапана.

Вода из бачка поз.8 через фильтр и выпускной клапан при движении плунжера вниз поступает в цилиндр. При движении плунжера вверх вода через выпускной клапан поступает по трубке поз. 19 к корпусу предохранительного клапана поз. 17 с установленным параллельно ему манометром поз. 15.

Насосы работают попеременно, т.е. при рабочем ходе плунжера одного насоса, плунжер другого насоса совершает обратный ход.

Насосный агрегат соединен с коллектором трубкой поз.9.

Коллектор состоит из ячеек для установки баллонов, поддона и разводки трубок и вентиляей.

На входе коллектора установлен запорный вентиль поз.20, на выходе коллектора - вентиль сброса давления поз. 16 и манометр поз. 14.

Подсоединение испытываемых баллонов осуществляется при помощи трубок поз. 12 и переходов поз.21 с резиновыми самоуплотняющимися кольцами. Коллектор защищен кожухом поз. 18.

Таблица 3.1. Техническая характеристика установки:

1.	Гидравлическое давление, развиваемое насосным агрегатом, МПа, до	- 50
2.	Число плунжеров, шт.	- 2
3.	Ход плунжера, мм	- 25
4.	Диаметр плунжера, мм	-14
5.	Число двойных ходов плунжера в минуту	- 36
6.	Число одновременно испытываемых баллонов, шт.	
	Вариант 1	- 9
	Вариант 2	- 18
7.	Электродвигатель, N=3 кВт, n=1500 об/мин	
8.	Редуктор червячный, передаточное отношение $i=40$	

Порядок проведения испытаний.

Заполнить малогабаритные корпуса водой и вернуть переходы поз.21.Подсоединить малогабаритные корпуса с переходами к трубкам поз.

12.Открыть вентили поз.20 и поз. 16.Открыть вентили поз. 11 и вывернуть на 1,5 ... 2 оборота разгрузочные винты поз. 13.Включить насосный агрегат, следить за выходом воды из трубки вентиля поз. 16 и отверстия разгрузочных винтов поз. 13. При прекращении выхода воздушных пузырьков и пены, закрыть разгрузочные винты поз. 13 и вентиль сброса давления поз. 16, закрыть и зафиксировать дверцы кожуха коллектора поз. 18.Следить за подъемом давления по манометрам поз. 14 и поз. 15. При достижении испытательного давления на манометрах поз. 14 и поз. 15 выключить насосный агрегат и закрыть вентиль поз.20.Выдержать баллоны под давлением по времени согласно требованиям технических условий.Сбросить давление до рабочего давления ($P_{\text{раб}}$) вентилем сброса давления поз. 16, открыть дверцы кожуха коллектора, осмотреть баллоны.

Выдержавшими испытания считать малогабаритные корпуса, на которых не обнаружено видимых деформаций, течи, потения. Сбросить давление в коллекторе до нуля, отсоединить малогабаритные корпуса, вывернуть переходы, слить воду.

3.1.3. Установка для циклического испытания малогабаритных корпусов

Установка для циклического испытания малогабаритных корпусов на прочность разработана с целью качественного выпуска малогабаритных корпусов.

Установка предназначена для испытания малогабаритных корпусов объемом до 7 литров на ресурс до 5000 циклов нагружения гидравлическим давлением до 30 МПа.

Установка состоит из следующих узлов и деталей (рис.3.3) 1- автомат общего включения; 2- лампочка контроля общего включения; 3- кнопки включения и выключения двигателя; 4- тумблер включения электроклапана; 5- лампочка контроля электроклапана; 6- счетчик числа циклов; 7- игольчатый кран; 8- каркас; 9- масляный бак; 10- электродвигатель; 11- плунжерный насос; 12- масляный фильтр; 13- электрогидравлический клапан; 14- предохранительный

клапан; 15- разделитель рабочей жидкости (масло-вода) – диафрагменный гидроаккумулятор; 16- каркас; -17- коллектор; 18- трубка; 19- переходник; М1; М3; М4 - манометры; М2 – электроконтактный манометр; В 1-В9 - вентили высокого давления

Перед испытаниями необходимо выполнить следующие операции. Залить в бак поз.9, 20 литров масла АМГ-10 (см. рисунок 3.3).

Залить в полость гидроаккумулятора поз. 15, воды, для этого необходимо:

- подсоединить вентиль В3 к централизованному водопроводу;
- закрыть вентили В1 и В2;
- открыть вентиль В3;
- при заполнении полости гидроаккумулятора водой закрыть вентиль

В3. Настроить предохранительный клапан поз.14 путем набора шайб 5 на давление сброса 50 МПа.

Испытание малогабаритных корпусов на циклические нагрузки.

Наполнить испытываемый малогабаритный корпус водой:

- ввернуть в баллон переходник поз.19 и при помощи накидной гайки прикрутить к трубке поз. 18;

- - открыть входной вентиль В4 и вентиль электроконтактного манометра В10;

- установить счетчик циклов поз, 6 в положение “00000”;

- открыть игольчатый кран поз.7;

- закрыть вентиль В3 заправки водой и вентиль В1, ведущий к стенду разрушения баллонов;

- установить на контактном манометре М2 давление:

- отнулевое - 4 МПа;

- рабочее - 20,6 МПа (29,4 мпа);

- включить питание. (автомат поз.1), при этом загорается

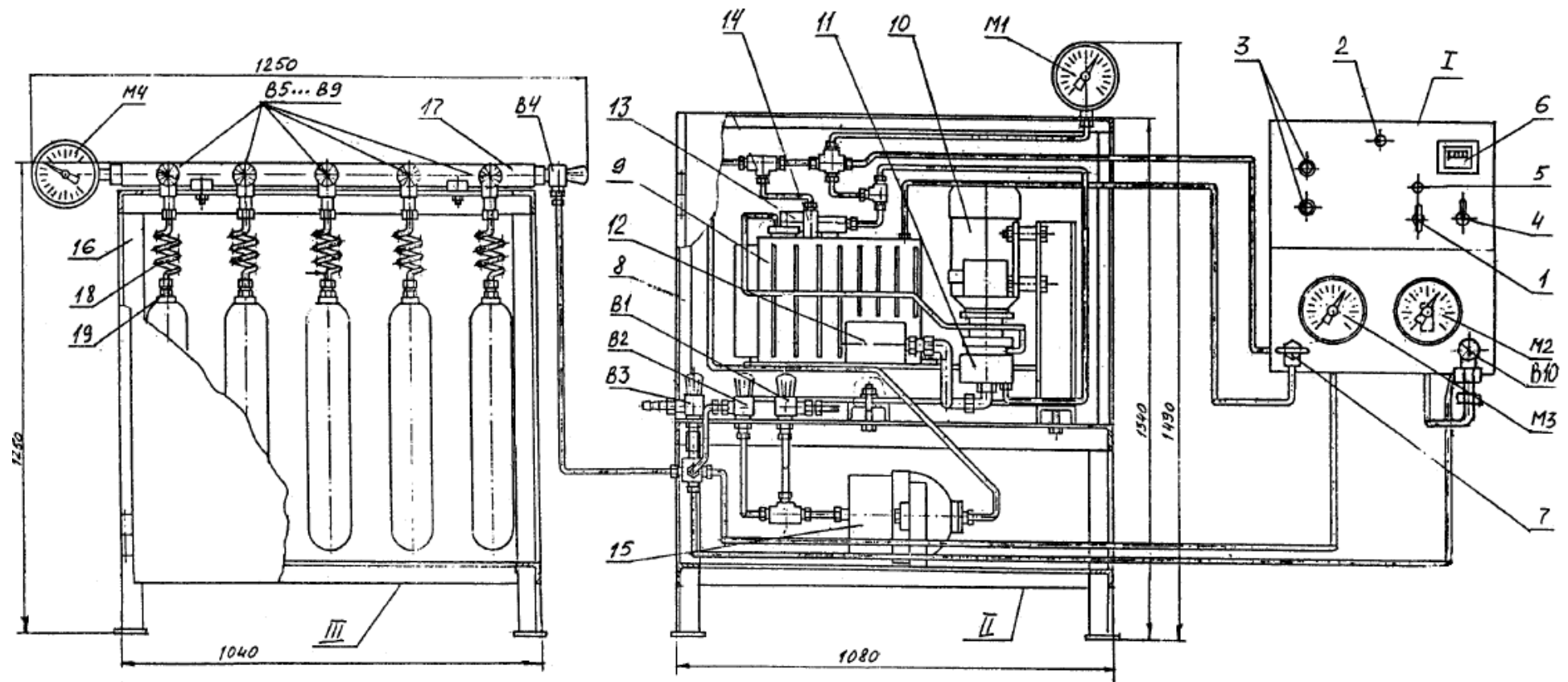


Рисунок 3.3. Установка для циклических испытаний

- сигнальная лампочка поз.2;
- включить двигатель (кнопки поз.3); тумблер поз.4 электрогидравлического клапана перевести в положение «включено» , при этом загорается сигнальная лампочка поз.5;
- закручивая игольчатый кран поз.7, создать рабочее давление 20,6 МПа (29,4 мпа);
- следить за подъемом давления по масляному манометру М1 и манометру М3 по воде. При появлении разницы в показаниях манометров прекратить нагружение и дозаправить систему водой, см.п.3.2

Испытания проводить до потери герметичности одного из малогабаритных корпусов. Если один из малогабаритных корпусов потерял герметичность, то доступ воды к нему перекрывается соответствующим вентилем В5 – В9. Записывается число циклов, при этом остальные продолжают испытываться.

При потере герметичности испытываемых малогабаритных корпусов установку отключить выключением электроклапана, двигателя и общего питания.

Записать показания счетчика.

Закрыть вентиль В4 и снять малогабаритный корпус.

3.2. Экспериментальные исследования влияния структуры укладки армирующего материала на массовое совершенство малогабаритных корпусов

3.2.1. Исследование шага намотки армирующего материала на деформационные свойства оболочки малогабаритного корпуса

Исследование проводится методом конечных элементов в программном комплексе DYNA [108]. Начальными данными для исследования является: геометрия конструкции металлокомпозитного малогабаритного корпуса, представленного в виде совокупности конечно-элементных сеток; модели материалов; условия нагружения конструкции и критерия разрушения для

применяемых материалов. Предполагается, что волокна, связующее и лейнер идеально скреплены друг с другом. При этом используется упругопластическая модель материала лейнера, модели волокна и связующего - упругие изотропные материалы. Характеристики связующей среды отличны от характеристик волокон.

Фрагменты геометрической модели цилиндрического металлокомпозитного малогабаритного корпуса и взаимное расположение слоев показаны на рис. 3.4.

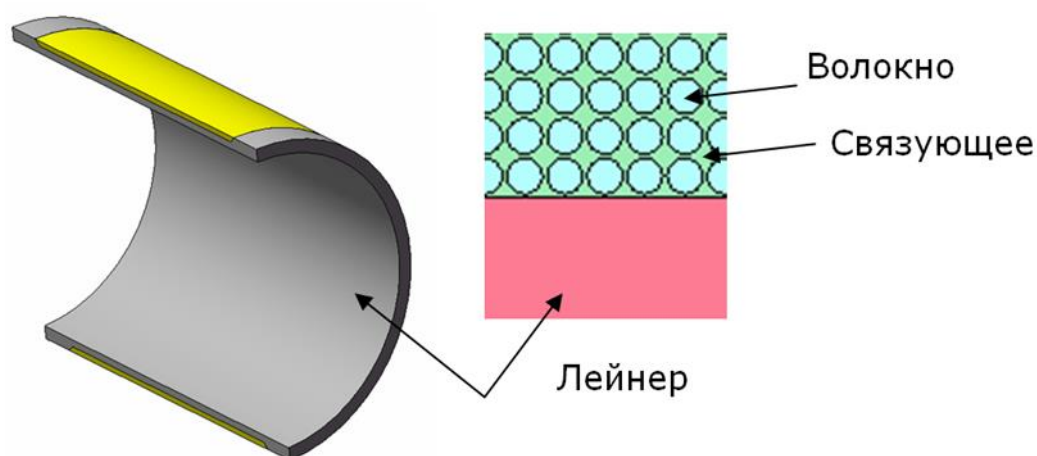


Рисунок 3.4. Расчетная схема металлокомпозитного малогабаритного корпуса

На первом этапе исследования в двухмерной постановке решалась осесимметричная задача, конечно - элементное разбиение оболочки металлокомпозитного малогабаритного корпуса, который показан на рис. 3.5.

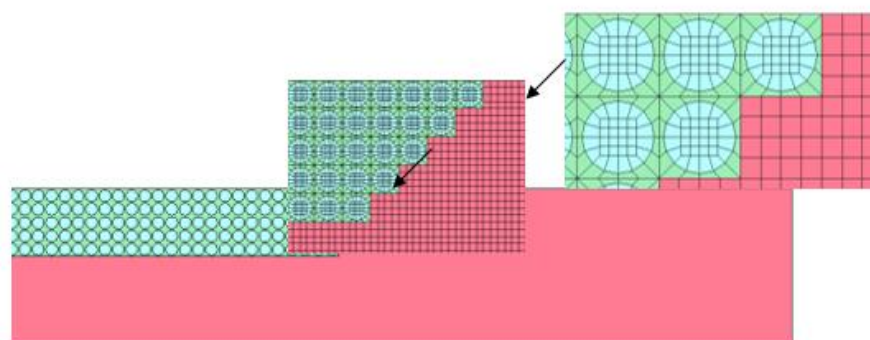


Рисунок 3.5. Конечно - элементное разбиение оболочки металлокомпозитного малогабаритного корпуса

Для лайнера принимаем:

- упругопластическую билинейную модель деформирования,
- модуль упругости материала лайнера $E=2.1 \cdot 10^6$ Па,
- напряжение текучести $\sigma_T=860 \cdot 10^6$ Па,
- тангенциальный модуль $E_T=100 \cdot 10^6$ Па,
- коэффициент Пуассона $\mu=0,3$,
- плотность $7,85 \cdot 10^3$ кг/м³,
- минимальная толщина обечайки 0,003м.

Упругие свойства компонентов композита:

а) волокно:

- модуль упругости $E=120 \cdot 10^9$ Па,
- коэффициент Пуассона $\mu=0,34$,
- плотность $1,37 \cdot 10^3$ кг/м³.

б) матрица:

- модуль упругости $E=3,1 \cdot 10^9$ Па,
- коэффициент Пуассона $\mu=0,42$,
- плотность $1,17 \cdot 10^3$ кг/м³.

Наружный диаметр композита $D_n=127$ мм, толщина композитного слоя $h_{сл}=2,25$ мм, концентрация объема волокон $V_f=0.56$.

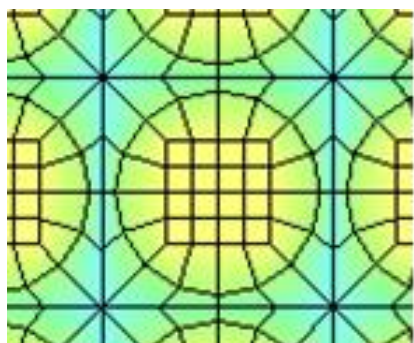


Рисунок 3.6.
Элементарная ячейка
волокна со связующим

Внутреннее давление изменялось по треугольному закону с максимальным значением $P_{max}=68,6$ МПа в момент времени $t=1$ мс и равным нулю при $t=2$ мс.

Для расчёта в МКЭ принимаем диаметр волокна 0,4 мм, размер элементарной квадратной ячейки 0,45x0,45, т.е. расстояние между волокнами 0,1 мм (рис.3.6).

Топология конечных элементов в продольном

сечении трехмерной двухслойной модели цилиндрической оболочки представлена на рис.3.7.

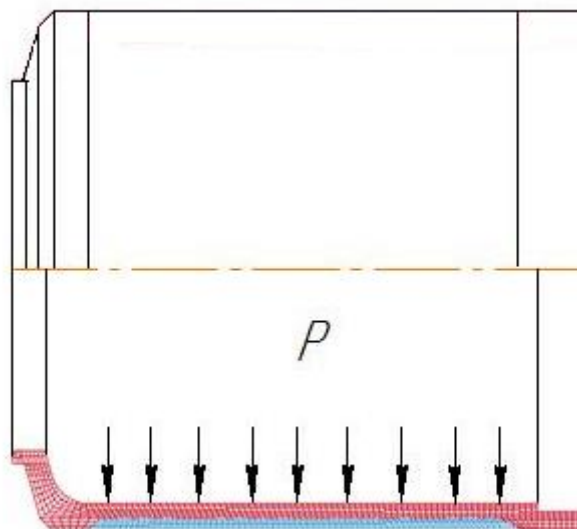


Рисунок 3.7. Топология конечных элементов в продольном сечении трехмерной двухслойной модели металлокомпозитной оболочки

Командный файл (его основное ядро) для программы конечно-элементного анализа в случае осесимметричной постановки задачи приводится на рис.3.8.

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*KEYWORD 50000000
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ Задача деформирования двухслойного баллона
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*TITLE
Steel+Orto 08.04.2009
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$ CONTROL CARDS.
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTROL_PARALLEL
4
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*CONTROL_TERMINATION
$ ENDTIM ENDCYC DTMIN ENDNEG ENDMAS
3.00E-03 0 .000 .000 .000
$ Время наблюдения процесса
*CONTROL_TIMESTEP
$ DTINIT SCFT ISDO TSLIMIT DTMS LCTM ERODE MS1ST
.000 .100 0

```

Рисунок 3.8. Командный файл для программы конечно - элементного анализа

Радиальное перемещение узлов в центральном сечении оболочки показано на рис. 3.9 при увеличении диаметра около 0,6 мм. ($2 \cdot 0,3 = 0,6$ мм).

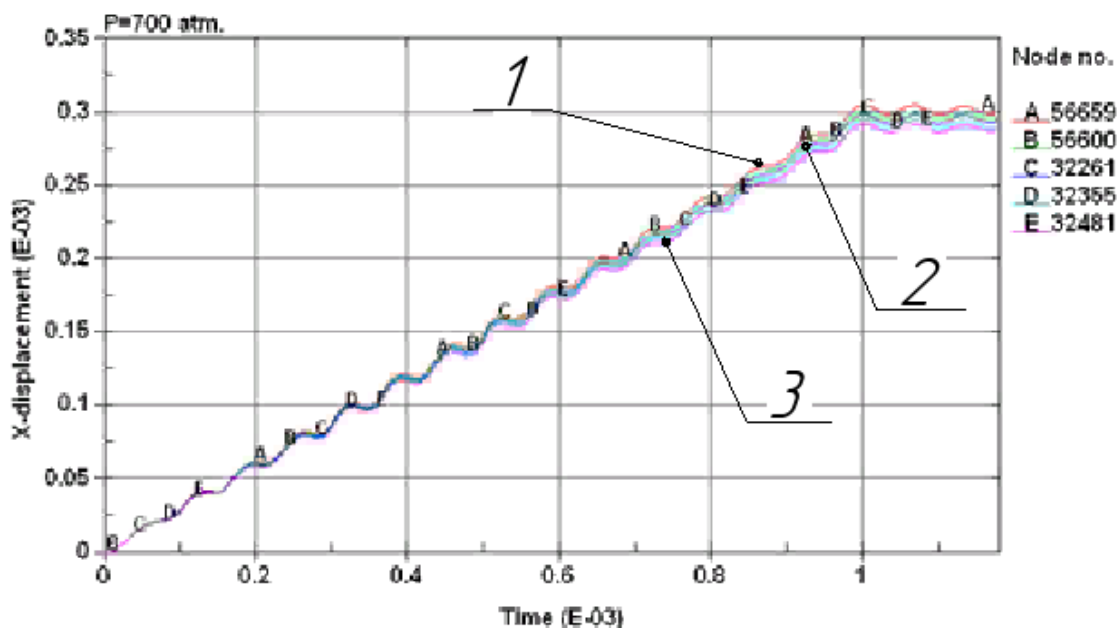


Рисунок 3.9. Радиальное перемещение узлов в центральном сечении оболочки

1-лейнер (сталь); 2- органонить СВМ; 3-связующее ЭД-20

Эксперимент дает два значения диаметра во взаимно перпендикулярных направлениях – 0,4 мм и 0,8 мм. Это означает, что есть какая-то неравномерность намотки.

На рис.3.10 показаны окружные напряжения в центральном сечении (в выбранных элементах) для стали (1), нити (2) и связующего (3).

Напряжения в лейнере составляют порядка 1100 МПа а в композите 600 МПа при внутреннем давлении 70 МПа.

На рис.3.11 показаны осевые напряжения в центральном сечении (в выбранных элементах) для стали (1), нити (2) и связующего (3) в направлении оси X.

При импульсном внутреннем давлении 70 МПа напряжения в лейнере и композите уменьшаются на 35-30 МПа.

Касательные напряжения (рис.3.12) в армированном слое изменяются в диапазоне от сжимающих 4 МПа до растягивающих 6 МПа.

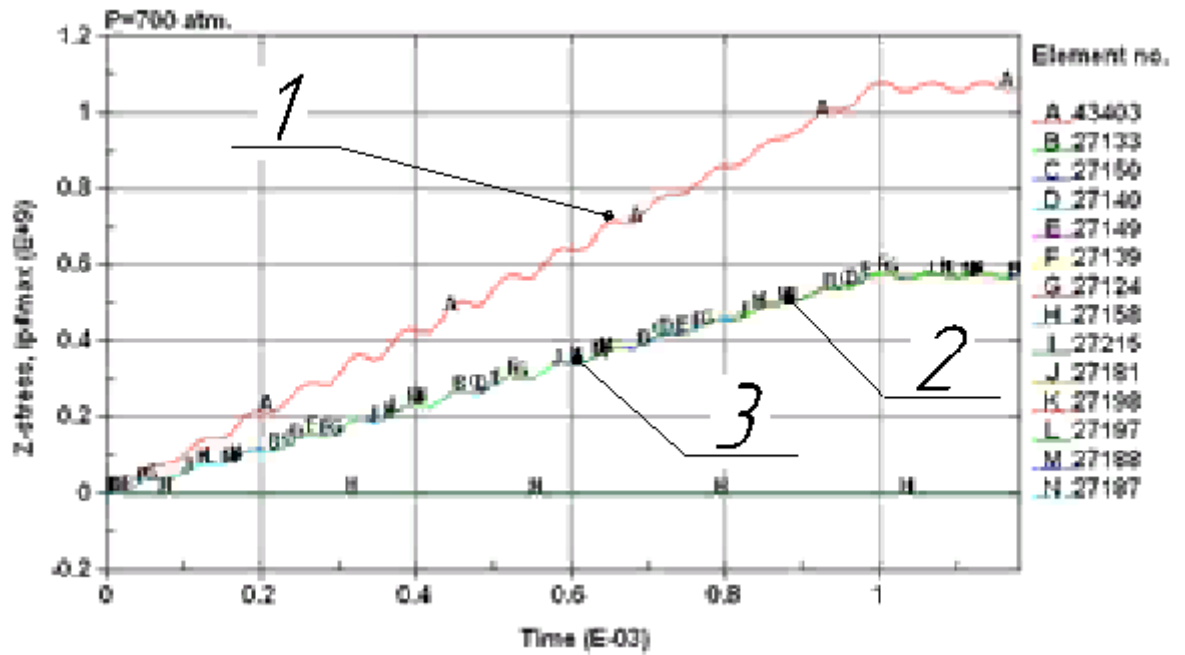


Рисунок 3.10. Окружные напряжения в центральном сечении (в выбранных элементах) 1-оболочка (сталь); 2- органонить СВМ; 3-связующее ЭД-20

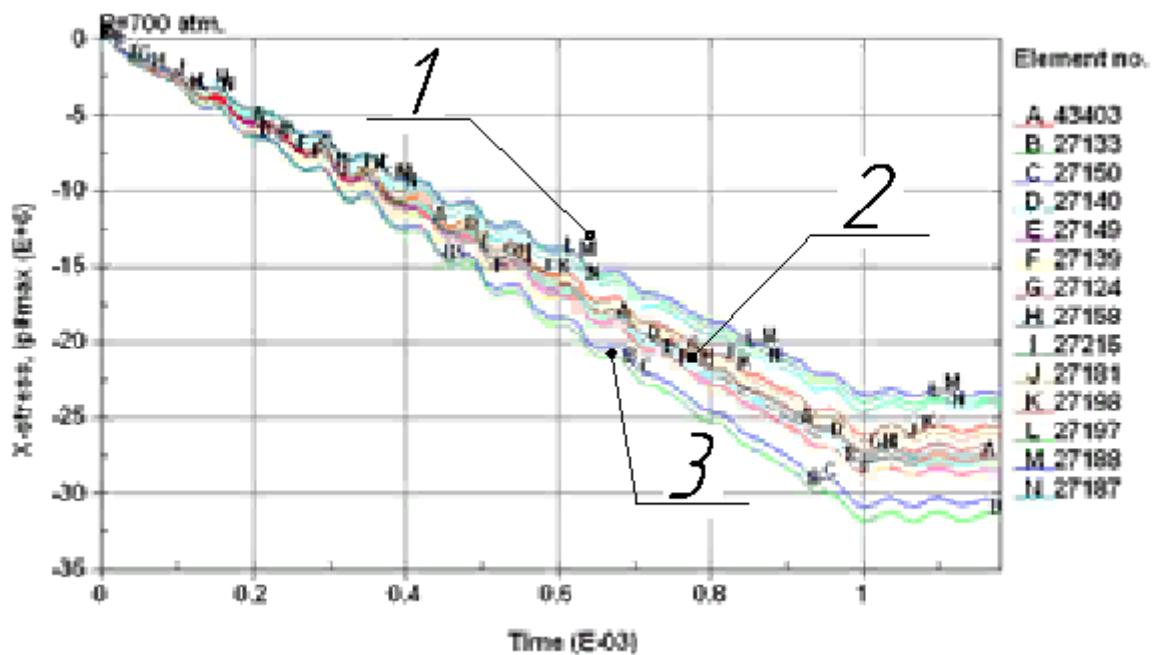


Рисунок 3.11. Осевые напряжения в центральном сечении (в выбранных элементах) 1-оболочка (сталь); 2- органонить СВМ; 3-связующее ЭД-20

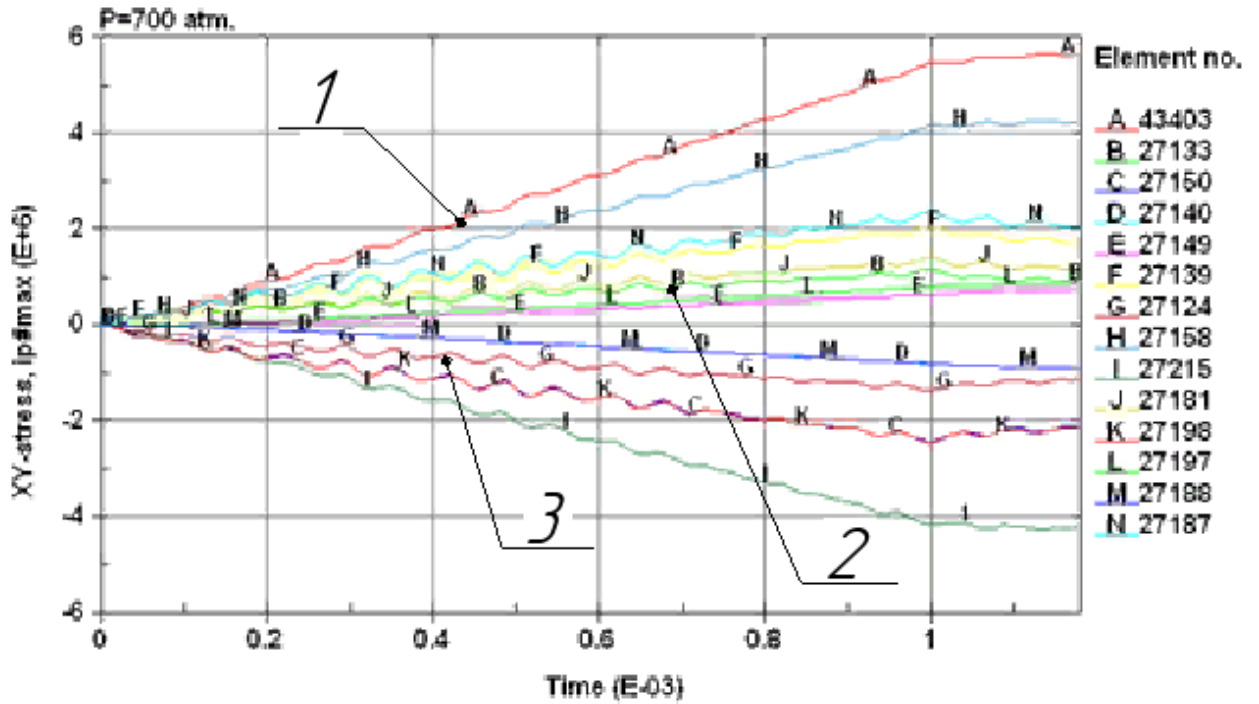


Рисунок 3.12. Касательные напряжения в центральном сечении (в выбранных элементах) 1-оболочка (сталь); 2- органонить СВМ; 3-связующее ЭД-20 в плоскости XY

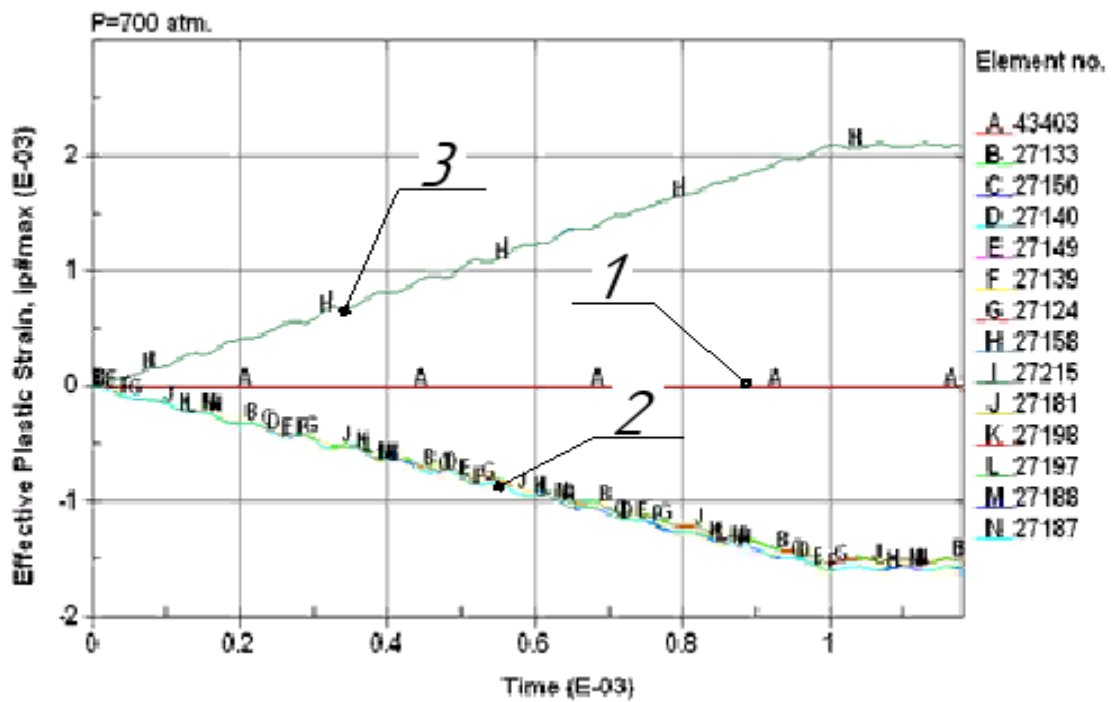


Рисунок 3.13. Эффективная деформация в центральном сечении (в выбранных узлах) 1-оболочка (сталь); 2- органонить СВМ; 3-связующее ЭД-20

Расчёт эффективной деформации (рис. 3.13) показывает, что внутренние слои композита при нагружении внутренним давлением 70 МПа растягиваются на 2 мм, а наружные сжимаются на 3 мм.

Изменение радиального перемещения по времени для точек,

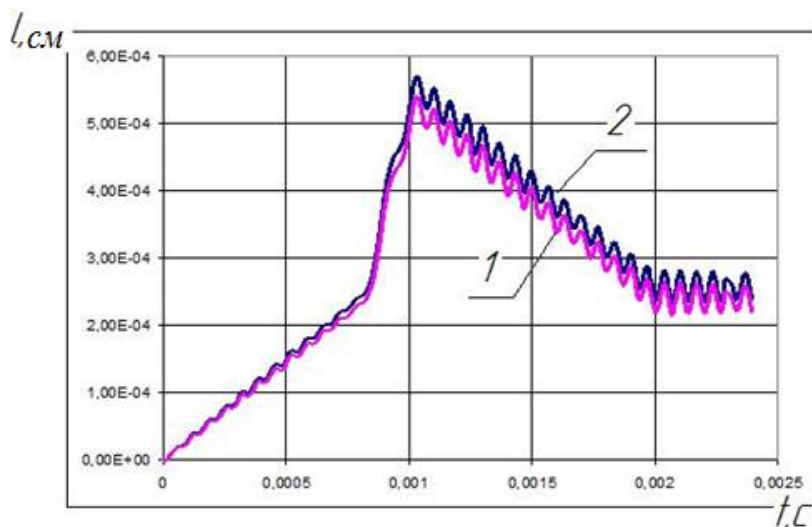


Рисунок 3.14 - Изменение радиального перемещения по времени для точек, расположенных на внутренней и внешней поверхностях в центральном сечении лайнера металлокомпозитного корпуса

увеличение прогибов оболочки, а после снятия нагрузки появляются остаточные деформации, максимальные величины которых лежат в пределах 0,22 мм для внешней поверхности (кривая 1) и 0,25 мм для внутренней (кривая 2).

расположенных на внутренней и внешней поверхностях в центральном сечении лайнера металлокомпозитного корпуса показано на рис.3.14. Кривые перемещения имеют колебательный характер, присущий волновым процессам при динамическом нагружении.

При достижении материалом лайнера предела текучести отмечается резкое

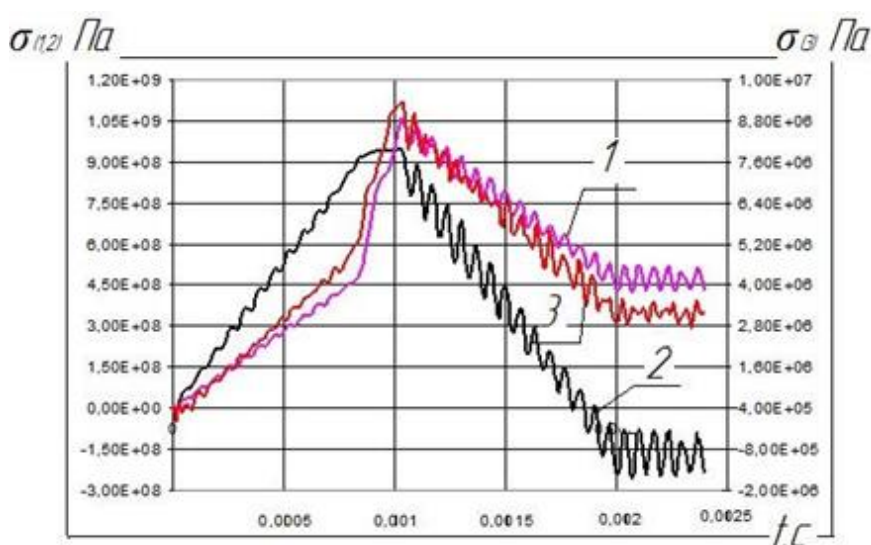


Рисунок 3.15 - Радиальные напряжения, действующие в центральном поперечном сечении лайнера металлокомпозитного корпуса

На рис. 3.15 приведены радиальные напряжения, действующие в центральном поперечном сечении лайнера металлокомпозитного корпуса (кривая 1), волокна (кривая 2) и связующего

(кривая 3). Каждая отдельная зависимость из

рис. 3.15, характерна для всех точек, лежащих в соответствующих областях, которые занимают компоненты металлокомпозитной оболочки.

Для подтверждения расчетов было проведено экспериментальное исследование процесса деформирования металлокомпозитного корпуса, нагруженного переменным внутренним давлением.

Выбранные для эксперимента следующие структурные параметры приведены в таблице 3.2.

Экспериментальные образцы малогабаритного корпуса (рис.3.16) обматывались органонитью СВМ (рис.3.17) 29,4 Текс на намоточном станке с ЧПУ с дальнейшей полимеризацией в печи.

Таблица 3.2. Структурные параметры намотки малогабаритного металлокомпозитного корпуса

№п/п	Наименование параметров	Значения параметров
1.	Армирующий наполнитель: органонить	СВМ-29,4
2.	Количество жгутов в ленте	10
3.	Связующее	ЭДТ-10
4.	Коэффициент армирования, %	65±2%
5.	Температура связующего, °С	60±2
6.	Натяжение на ленту, Н	8,8
7.	Диаметр отжимной фильеры, мм	0,8
8.	Количество фильер	1



Рисунок 3.16. Лейнер малогабаритного корпуса до намотки



Рисунок 3.17. Малогабаритный металлокомпозитный корпус после намотки

Результаты эксперимента приведены в табл. 3.3. Измерения диаметров металлокомпозитного корпуса проводились в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в средней части малогабаритного металлокомпозитного корпуса (параметры D_1 и D_2).

Таблица 3.3. Измерения диаметров металлокомпозитного корпуса

№ измерения	Давление P, МПа	Диаметр D_1 , мм	Диаметр D_2 , мм
1	0	126,9	127,1
2	49,0	127,0	127,2
3	53,9	127,2	127,3
4	63,7	127,4	127,4
5	68,6	127,7	127,5

Таким образом, при давлении $P=68,6$ МПа увеличение диаметра малогабаритного металлокомпозитного корпуса D_1 составляет 0,8 мм, а для диаметра D_2 такое увеличение равно 0,4 мм.

Заметим, что без армирования максимальное увеличение диаметра лейнера металлокомпозитного корпуса при давлении $P=34,3$ МПа составляет 0,3 мм, а при давлении $P=58,8$ МПа расчетное изменение диаметра для лейнера металлокомпозитного корпуса составляет примерно 5 мм.

Оценка точности методики проведена по результату тестового расчета для однослойной цилиндрической анизотропной оболочки с углом укладки нити $\beta = 60^\circ$.

Матрица упругих свойств композитного материала в терминах программы конечно-элементного анализа приведена на рис. 3.18.

```

*MAT_ANISOTROPIC_ELASTIC
$MATERIAL NAME: ANISO
$1 MID RO C11 C12 C22 C13 C23 C33
3 1.900E+03 2.050E+10 8.921E+09 2.819E+10 5.376E+09 6.584E+09 2.815E+10
$2 C14 C24 C34 C44 C15 C25 C35 C45
1.229E+09 5.433E+09 1.046E+09 1.014E+10 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
$3 C55 C16 C26 C36 C46 C56 C66 AOPT
8.425E+09 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 2.728E+09 5.275E+09 4.000E+00
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$4 XP YP ZP A1 A2 A3 MACF
0.0 0.0 0.0 1
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$5 V1 V2 V3 D1 D2 D3 BETA REF
0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

```

Рисунок 3.18. Матрица упругих свойств композитного материала

При этом экспериментальная остаточная радиальная деформация малогабаритного корпуса ΔR_0 составляет 0,3мм, а ее расчетное значение равно $\Delta R_p \approx 0,25$ мм (рис.3.19).

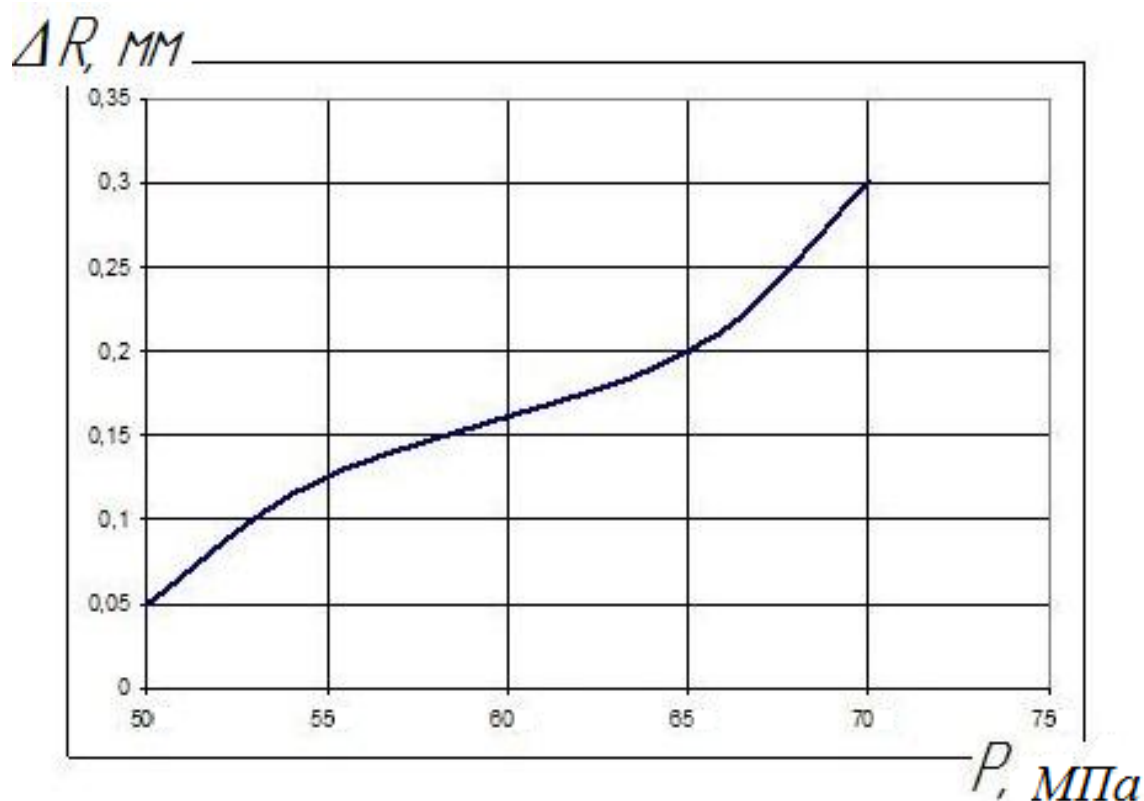


Рисунок 3.19. Изменение остаточной радиальной деформации от нагружения намотанного малогабаритного корпуса

3.2.2. Исследование комбинированной структуры намотки армирующего материала на деформационные свойства и массовое совершенство малогабаритного корпуса

Намотка композитного слоя малогабаритного корпуса объемом семь литров ведётся стеклонитями ЕС-7-34x1x3(80) (ГОСТ 8325-93) на эпоксидном связующем в составе ЭД-20 (ГОСТ10587-84) и отвердителя триэтанолamina (ТУ 6-09-2448-72). Если проводить намотку одним семейством нитей, то при данных геометрических размерах у штуцера и приставного центра будет накапливаться большая толщина армирующего материала, приводящая к искажению контура и

несущей способности малогабаритного корпуса. Поэтому намотку спирального слоя проводим двумя семействами нитей или же двузонной намоткой.

Определяем угол армирования из выражения

$$\varphi = \arcsin \frac{d}{D}, \quad (3.1)$$

где d -диаметр полюса;

D -диаметр экватора (цилиндрической части лейнера).

На цилиндрической части угол армирования со стороны днища равен $11,53^\circ$, со стороны приставного центра $7,66^\circ$, тогда средний угол армирования спирального слоя первой зоны

$$\varphi = 9,6^\circ.$$

Угол армирования второй зоны назначался таким образом чтобы диаметр полюса не выходил за пределы сварочного шва приварки штуцера (диаметр полюса – 44 мм).

Угол армирования спирального слоя второй зоны

$$\varphi = 19,0^\circ.$$

Для экспериментальной проверки расчётных толщин спирального и кольцевого слоя были изготовлены три малогабаритных корпуса, с последующими гидравлическими испытаниями.

Три малогабаритных корпуса были нагружены водой до давления 30 МПа с замером окружной и осевой относительных деформаций через каждые 5,0 МПа. Измерение проводилось тензометрическими скобами, посредством измерительного комплекса СИИТ-3. Замеры проводились на цилиндрической части, в центре и у днища малогабаритного корпуса.

Значения относительных деформаций по испытанным малогабаритным корпусам сведены в таблицу 3.4.

Далее один намотанный малогабаритный корпус был установлен на установку для ресурсных испытаний при переменном нагружении водой от 3 до 23 МПа, с периодом нагружения четыре секунды. При 4200 циклах нагружения была замечена капельная течь воды на цилиндрической части малогабаритного

корпуса. Через продолжающих 30-40 циклов нагружений появилась обвальная течь по продольному сварочному шву цилиндрической части лейнера.

Таблица 3.4. Значения относительных деформаций оболочки малогабаритного корпуса

P, МПа	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0
ε _{ок} , %	0,041	0,094	0,145	0,200	0,280	0,370	0,480
ε _{ос} , %	0,021	0,045	0,071	0,101	0,142	0,181	0,242
ε _{ЭКВ} , %	0,045	0,104	0,161	0,224	0,313	0,411	0,536

Два малогабаритных корпуса были нагружены до разрушения (рис.3.20), при этом были получены следующие значения разрушающих давлений: 59,0 и 60,0 МПа.



Рисунок 3.20. Внешний вид малогабаритного корпуса после испытаний на разрушение

Исследования, проведенные на корпусах с АМ из одного семейства нитей, спроектированных из условия статического нормативного запаса прочности, показали, что большая величина относительных деформаций приводит в процессе их эксплуатации к усталостному разрушению металлического лейнера и потере герметичности изделия. Использование высокомодульного АМ (углеродная нить)

для изготовления корпусов с целью снижения деформаций приводит к высокой стоимости изделия.

Кроме того, для повышения конструкционной прочности углеродного АМ в изделиях, необходимо обеспечить опрессовочное давление в пластике, которое можно создать натяжением АМ или внешним давлением. Однако при создании высокого натяжения АМ повреждается при прохождении через пропиточно-формуемый тракт намоточного станка. Создание внешнего давления на корпус

требует дополнительных технических затрат в производстве. Рациональным процессом представляется кольцевая намотка углеродного АМ, поверх которого наматывается стеклянный АМ, используемый как опрессовочный по отношению к углеродному.

В связи с тем, что окружная деформация превышает осевую более чем в два раза и является основной составляющей в определении эквивалентной, то целью исследования являлось определение рационального сочетания высокомодульного углеродного (УКН-5000) и стеклянного (ЕС-7-34х1х3(80)) АМ в кольцевом слое, а также определение влияния основных структурных факторов композитного слоя на массовое совершенство корпусов, конструкционную прочность АМ в слоях и деформационные свойства стенки корпусов, определяющих его ресурс.

При проведении экспериментальных исследований в работе использовался метод активного планирования двухфакторного эксперимента при равномерном плане на 13 точек согласно планам и рекомендациям, изложенным в работе [84].

Кроме того, с целью исключения влияния неучтенных погрешностей при проведении эксперимента, использовался прием рандомизации - порядок изготовления корпусов и их испытание определялся при помощи генератора случайных чисел.

В качестве независимых варьируемых параметров выбраны коэффициент реализуемости прочности K и коэффициент m поливолоконности характеризующий соотношения количества стеклянного АМ ко всему пакету кольцевого слоя:

$$m = \frac{h_{cm}^k}{h_{cm}^k + h_{уг}^k} \quad (3.2)$$

где $h_{cm}^k, h_{уг}^k$ – толщины АМ из стекло- и угленитей в кольцевом слое.

Если $m=1$, то кольцевой слой состоит из стеклонитей, а если $m=0$, то кольцевой слой состоит только из угленитей.

Экспериментальные исследования проводились на намотанных корпусах. Статическая несущая способность лейнера не учитывалась. Так как в эксперименте проводился сравнительный анализ, то значения связующего и лейнера не учитываем и величину совершенства по массе (1.1) определяем не для всего корпуса, а только для цилиндрической части, как наибольшей в массовом отношении ко всему корпусу.

Массовое совершенство корпусов рассчитывали по формуле:

$$W = \frac{P_{\text{разр}} D}{4[\rho_{\text{ст}}(h_{\text{ст}}^{\text{сп}} + h_{\text{ст}}^{\text{к}}) + \rho_{\text{уг}} h_{\text{уг}}^{\text{к}}]} \quad (3.3)$$

где $\rho_{\text{ст}}$, $\rho_{\text{уг}}$ – плотность стекло- и угленити,

$h_{\text{ст}}^{\text{сп}}$ – толщина АМ спирального стеклянного слоя,

$h_{\text{ст}}^{\text{к}}$ – толщина АМ кольцевого стеклянного слоя,

$h_{\text{уг}}^{\text{к}}$ – толщина АМ кольцевого угольного слоя,

D – диаметр цилиндрической части малогабаритного корпуса.

Уровни параметров имели значения, представленные в таблице 3.5 и на рисунке 3.21, где цифрами в узлах сочетаний параметров m и K обозначены номера опытов (корпусов) из табл. 3.5.

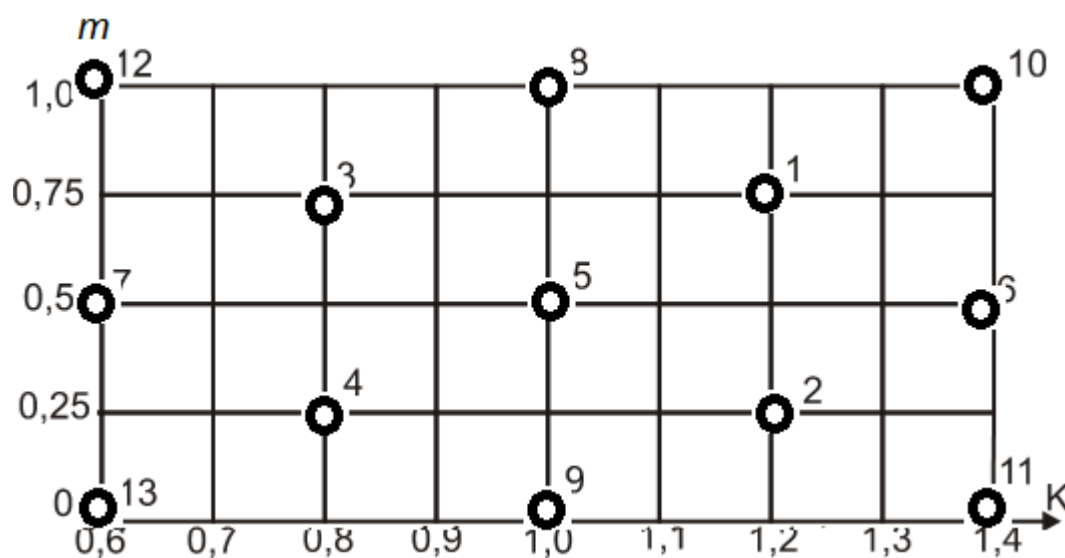


Рисунок 3.21. Расположение опытных точек на поле варьируемых параметров

Экспериментальные корпуса имели одинаковую толщину стеклянного АМ в спиральном слое, равную 0,061 см. Малогабаритные корпуса изготавливались на связующем ЭДТ-10 и полимеризовались при одинаковом температурном режиме.

В процессе нагружения корпусов производился замер окружных $\epsilon_{ок}$, осевых $\epsilon_{ос}$ и определение эквивалентных $\epsilon_{экр}$ относительных деформаций. Затем малогабаритные корпуса разрушались внутренним давлением. По разрушающему давлению находилось рабочее давление как $P_{разр}/2,6$, где 2,6 – нормативный коэффициент безопасности [84] и относительные деформации при рабочем давлении $(\epsilon_K^{раб}, \epsilon_{ос}^{раб}, \epsilon_{ЭКВ}^{раб})$.

Относительные деформации определялись с помощью тензометрического комплекса СИИТ-3. При разрушающих давлениях определялись напряжения в АМ спирального и кольцевого слоев.

По результатам эксперимента отыскивались функции отклика y в виде полинома второго порядка:

$$y = a_0 + a_1K + a_2m + a_3K^2 + a_4Km + a_5m^2 \quad (3.4)$$

Обработка результатов эксперимента, произведенная по способу наименьших квадратов, позволила получить функции отклика следующих видов:

$$W_{бал} = 26,32 + 11,52K - 18,16m - 10,3K^2 - 4,17Km + 19,36m^2, \text{ (км)} \quad (3.5)$$

$$\sigma_K = 422,00 + 311,00K + 141,00m + 87,00K^2 + 28,00Km + 168,00m^2, \text{ (x10, МПа)} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{сн} = 47,42 + 168,00K + 81,16m + 69,62K^2 + 19,72Km + 93,65m^2, \text{ (x10, МПа)} \quad (3.7)$$

$$\epsilon_{ок}^{раб} = 0,386 - 0,397K - 0,103m + 0,198K^2 - 0,313Km + 0,687m^2, \text{ (%)} \quad (3.8)$$

$$\epsilon_{ос}^{раб} = 0,206 + 0,116K - 0,18m - 0,09K^2 + 0,068Km + 0,158m^2, \text{ (%)} \quad (3.9)$$

$$\epsilon_{ЭКВ}^{раб} = 0,389 - 0,226K + 0,026m + 0,204K^2 - 0,098Km + 0,197m^2, \text{ (%)} \quad (3.10)$$

Из анализа выражений (3.4 – 3.9) и численных величин, представленных на графиках рис.3.22 – 3.27, можно сделать следующие выводы:

- конструкционная прочность АМ в кольцевом слое зависит от соотношения толщин угле- и стеклонитей. Минимального значения прочность достигает при содержании стеклонитей равном 40%. Это происходит из-за того, что при нагружении такого слоя сначала разрушаются углениты, а после этого вся нагрузка воспринимается стеклянными и следовательно, имеет место их лавинное разрушение. Кроме того, чем меньше K (т.е. чем тоньше кольцевой слой), тем выше прочность АМ. Из полученных результатов следует, что за разрушающие напряжения кольцевого слоя (когда заведомо он разрушается) можно принимать напряжения в корпусах, изготовленных с величиной $K < 0,8$;

- конструкционная прочность АМ в спиральном слое (при $K > 0,8$, т.е. когда разрушаются спиральные слои) остается практически одинаковой при фиксированных значениях m , но зависит от этого параметра. Это происходит потому, что m влияет на податливость материала в кольцевом направлении, а, следовательно, и на напряженно-деформированное состояние спирального слоя. Реализованная прочность АМ в спиральном слое (стеклянном) меньше, чем прочность АМ в кольцевом, если он изготовлен только из стеклонитей, так как способ формирования спирального слоя не позволяет устранить разнотяннутость нитей при укладке их по днищам малогабаритного корпуса;

- максимального массового совершенства малогабаритные корпуса достигают при 100% содержании угленитей в кольцевом слое ($m=0$). Почти таких же значений массового совершенства достигают корпуса, изготовленные из стеклонитей ($m=1$) за счет достаточно высокой удельной прочности стеклянного АМ. При 60% содержании угленитей массовое совершенство достигает минимальных значений по той же причине, что и прочность кольцевого слоя. Для каждого значения m существует свое оптимальное значение K^{opt} ;

- несмотря на то, что при проведении эксперимента толщина АМ спирального слоя на всех корпусах оставалась одинаковой, увеличение толщины

АМ кольцевого слоя (стеклонитей) приводит к увеличению осевой деформации. Окружная деформация с увеличением АМ в кольцевом слое соответственно уменьшается. Минимального значения окружная деформация достигает при $m=0,25$ (когда стеклянный слой составляет 25% от толщины пакета). Из сказанного следует, что относительные деформации в окружном и осевом направлениях имеют взаимосвязанный характер, и их прогнозирование возможно на основе физической модели работы слоев при плоском напряженно-деформированном состоянии;

– эквивалентная относительная деформация, влияющая на усталостную долговечность малогабаритного корпуса (из-за усталости металла лейнера), зависит от параметров K и m . Минимального значения $\varepsilon_{\text{экв}}$ достигает при $K=1,1$ и $m=0,25$. Это достигается тем, что стеклонить наматывалась на угольную нить и создавала дополнительное контактное давление, приводящее к улучшению свойств слоя угленити. Следует отметить, что у корпусов, намотанных по расчетной прочности с коэффициентом безопасности 2,6 $\varepsilon_{\text{экв}} = 0,266\%$, обеспечивается ресурс около четырех тысяч нагружений до рабочего давления.

– анализ величин массового совершенства и эквивалентной относительной деформации показал, что значения $W_{\text{бал}}^{\text{max}}$ и $\varepsilon_{\text{экв}}^{\text{min}}$ достигаются при различных величинах параметров K и m , т.е. при технологическом процессе качества намотки необходимо устанавливать компромисс между массой и ресурсом малогабаритного корпуса.

Таблица 3.5 - Структурные параметры намотки и экспериментальные значения исследуемых малогабаритных корпусов

№ опыта	Структурные параметры намотки						Экспериментально полученные величины							
	K	m	h_{cn}	h_k^{cm}	h_k^{y2}	$h_k^{cm} + h_k^{y2}$	$P_{разр}$	$P_{раб}$	$\varepsilon_k^{раб}$	$\varepsilon_{oc}^{раб}$	$W_{бал}$	$\varepsilon_{экв}^{раб}$	σ_{cn}	σ_k
	---	---	мм	мм	мм	мм	МПа	МПа	%	%	кМ	%	МПа	МПа
1	1,2	0,75	0,59	0,785	0,262	1,047	46	17,8	0,22	0,27	14,8	0,35	1438	1196
2	1,2	0,25	0,59	0,262	0,785	1,046	52	20,2	0,15	0,22	20,1	0,27	1599	1334
3	0,8	0,75	0,59	0,532	0,175	0,707	52	20,2	0,35	0,23	22,1	0,42	1599	2001
4	0,8	0,25	0,59	0,175	0,532	0,707	55	21,7	0,25	0,29	26,3	0,38	1725	2162
5	1,0	0,5	0,59	0,441	0,441	0,882	49	19,4	0,20	0,24	20,1	0,40	1530	1541
6	1,4	0,5	0,59	0,622	0,622	1,244	55	24,2	0,17	0,36	19,8	0,39	1725	1231
7	0,6	0,5	0,59	0,255	0,255	0,510	42	15,8	0,23	0,18	21,2	0,29	1277	2139
8	1,0	1,0	0,59	0,882	---	0,882	58	26,7	0,47	0,33	22,3	0,57	1817	1817
9	1,0	0,0	0,59	---	0,882	0,882	54	20,8	0,24	0,28	24,6	0,37	1656	1656
10	1,4	1,0	0,59	1,219	---	1,219	56	22,1	0,37	0,35	17,5	0,51	1725	1231
11	1,4	0,0	0,59	---	1,219	1,219	56	22,1	0,12	0,35	21,2	0,37	1725	1231
12	0,6	1,0	0,59	0,532	---	0,532	62	28,0	0,63	0,24	30,2	0,67	1921	3197
13	0,6	0,0	0,59	---	0,532	0,532	52	20,2	0,24	0,32	27,7	0,41	1599	2668

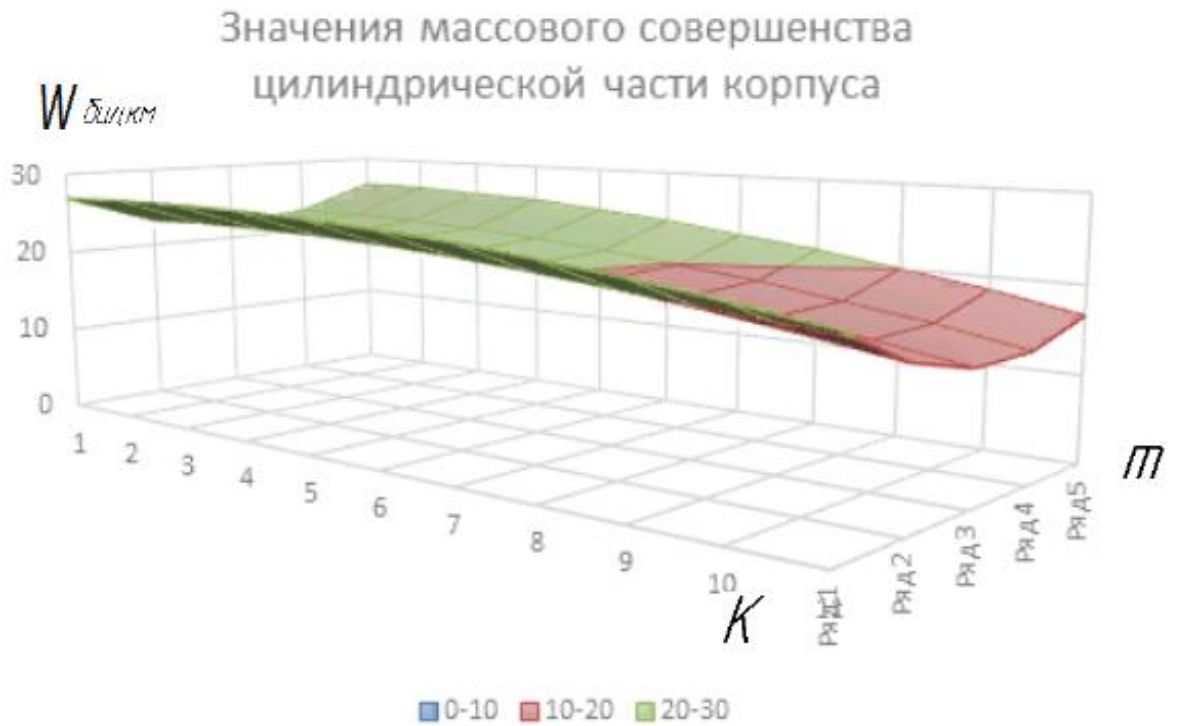


Рисунок 3.22. Значения совершенства по массе ($W_{\text{бал}}$, км) цилиндрической части корпусов в зависимости от структурных параметров намотки

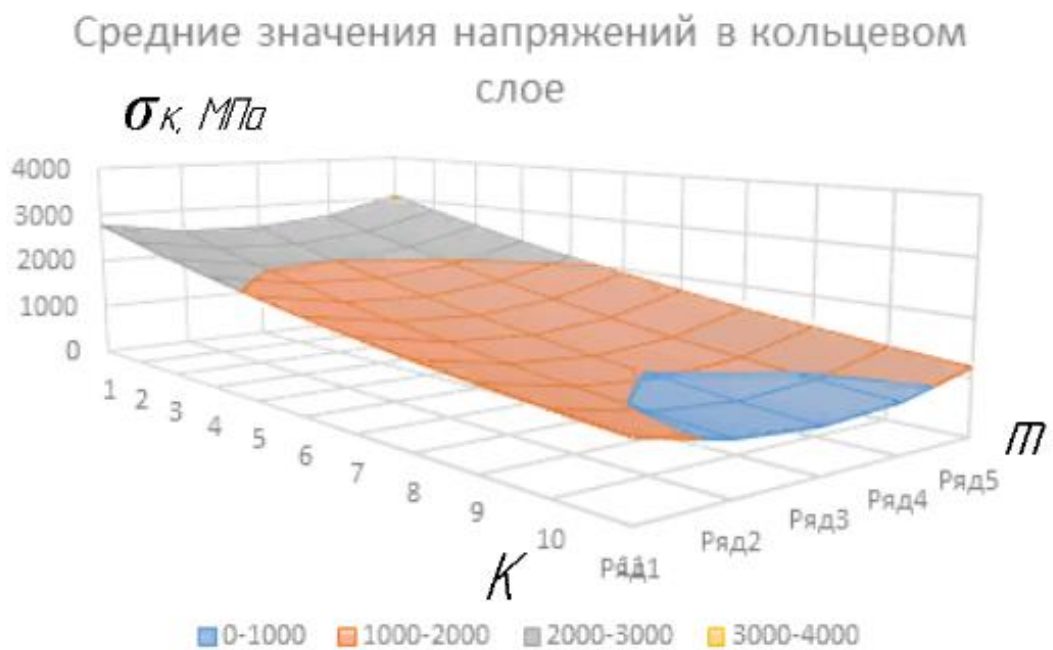


Рисунок 3.23. Значения средних напряжений в армирующем материале кольцевого слоя в момент разрушения корпусов (σ_k , МПа) в зависимости от структурных параметров намотки

Средние значения напряжений в спиральном слое

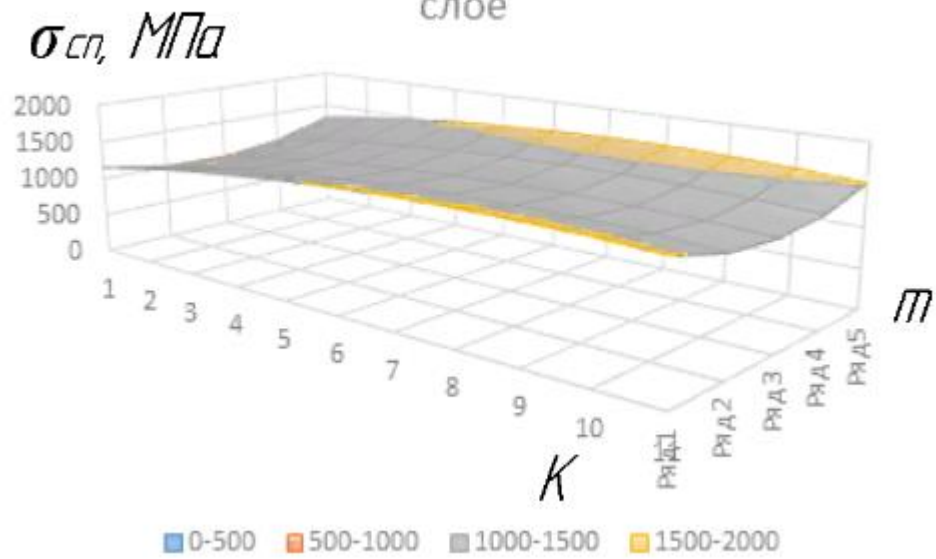


Рисунок 3.24. Значения средних напряжений в армирующем материале спирального слоя ($\sigma_{сп}$, МПа) в момент разрушения корпусов в зависимости от структурных параметров намотки

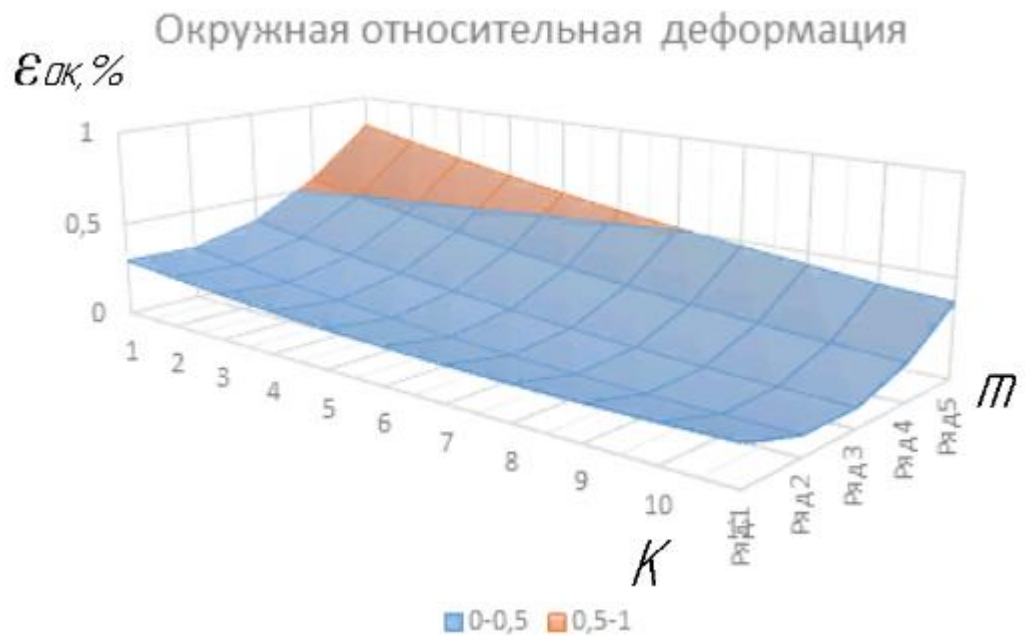


Рисунок 3.25. Значения окружной относительной деформации ($\varepsilon_{ок}^{раб}$, %) при рабочем давлении в корпусе в зависимости от структурных параметров намотки

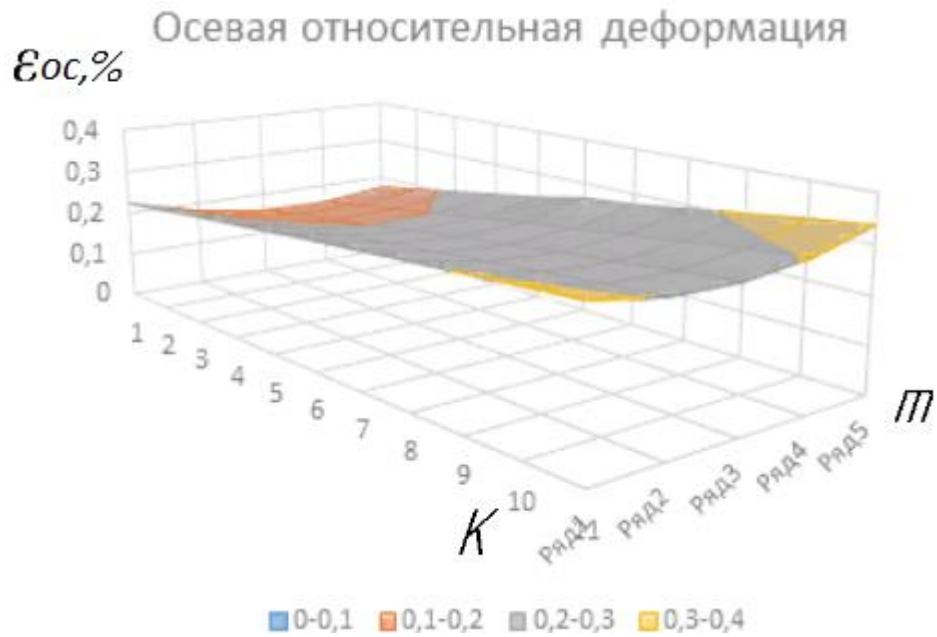


Рисунок 3.26. Значения осевой относительной деформации ($\varepsilon_{ос}^{раб}$, %) при рабочем давлении в корпусе в зависимости от структурных параметров намотки

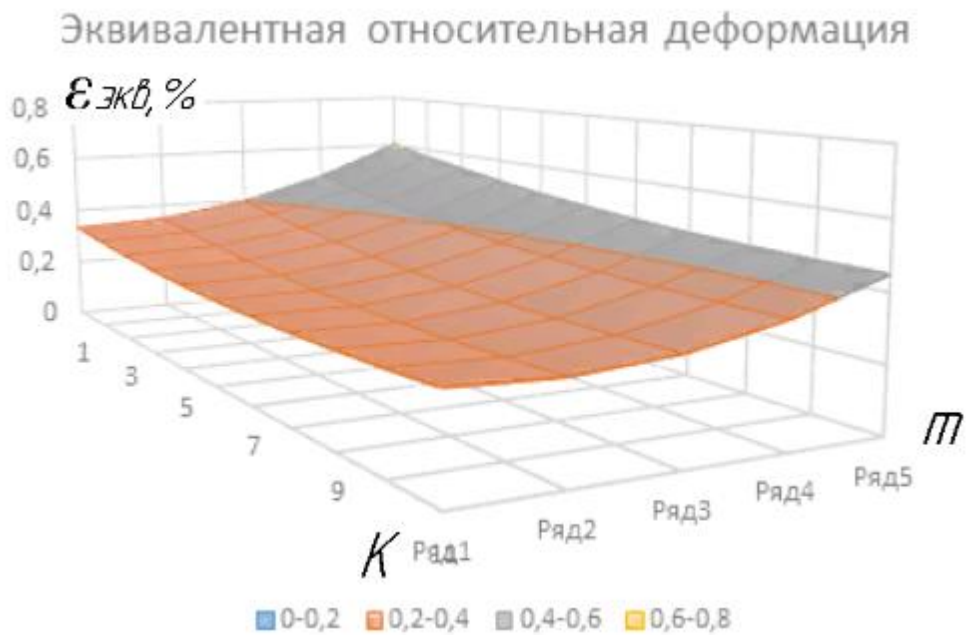


Рисунок 3.27. Значения эквивалентной относительной деформации ($\varepsilon_{экв}^{раб}$, %) при рабочем давлении в корпусе в зависимости от структурных параметров намотки

3.2.3. Исследование зонной структуры намотки днища на массовое совершенство малогабаритного корпуса

Остановимся на определении углов армирования φ_{ai} и толщин слоев h_{ai} , входящих в уравнение

$$\sigma_T h_M + \bar{\sigma}_1 \sum_{i=1}^2 h_{ai} \cos^2 \varphi_{ai} = \frac{1}{2} \bar{p} a \quad (3.10)$$

По конструктивным соображениям, как правило, задается радиус полюсного отверстия, который для рассматриваемого баллона составил $r_{01} = 13,5 \text{ мм}$. Угол армирования φ_{ai} находится по формуле

$$r_{01} = a \sin \varphi_{ai} \quad (3.11)$$

и оказывается равным 11° . Этот угол соответствует внутренней кромке, наматываемой лены, которая касается контура полюсного отверстия. При ширине ленты $w = 10 \text{ мм}$ её наружная кромка имеет радиус $23,5 \text{ мм}$, что соответствует углу армирования 20° . Замеренный угол армирования на экваторе днища экспериментального баллона оказался равным $9,6^\circ$, т.е. принято $\varphi_{a1} = 9,6^\circ$. Аналогичным образом получен угол армирования второго слоя, т.е. $\varphi_{a2} = 22^\circ$. При этом, согласно равенству (3.11), $r_{02} = 26 \text{ мм}$. Наибольший вклад в восприятие осевой силы обеспечивает первый слой с углом армирования $9,6^\circ$ и его толщина должна быть максимально возможной.

Как уже отмечалось, толщина этого слоя на экваторе днища определяется ограничением на толщину слоя в окрестности полюсного отверстия, где она значительно возрастает (рис.3.28). Для оценки толщины слоя при проектировании баллона использовалось равенство:

$$h_i(r) = h_{ai} \frac{a \cos \varphi_{ai}}{r \cos \varphi_i(r)}, \quad (3.12)$$

которое справедливо при радиусах больших $r_w = r_{01} + w$, где w - ширина ленты (при $r = r_{01}$ формула (3.12) дает бесконечно большое значение для толщины слоя).

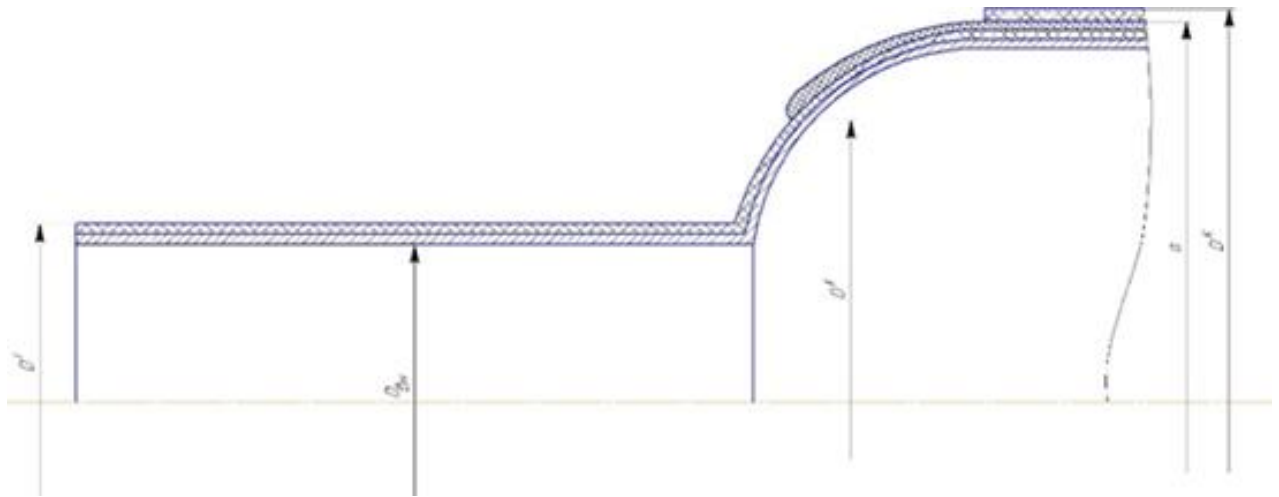


Рисунок 3.28. Радиальное разбиение днища корпуса на зоны

При $r \leq r_w$ толщина днища считалась постоянной и равной толщине при $r = r_w$. Такой характер изменения толщины первого слоя приближенно соответствует реальному закону изменения толщины слоя, показанному на рис.3.28.

Проведенный анализ показал, что допустимая максимальная толщина (порядка 10 мм, соизмеримая с толщиной цилиндрической части баллона) реализуется при намотке 6 двойных спиральных слоев, что при найденной толщине элементарного слоя соответствует толщине первого слоя на экваторе днища $h_{a1}=3,6\text{мм}$. Для оценки толщины второго слоя с углом армирования 22° можно воспользоваться уравнением (3.12). Поскольку вклад лайнера и первого слоя известен, можно оценить требуемую величину толщины второго слоя. Она составляет $h_{a2}=1,8\text{мм}$, что соответствует трем двойным спиральным слоям.

Структура композитной оболочки малогабаритного корпуса приведена в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Структура композитной оболочки малогабаритного корпуса

Номер слоя, i	Количество двойных спиральных слоев	Угол армирования на экваторе, φ_{ai}^0	Толщина на экваторе, $H_{ai}, \text{мм}$	Структура цилиндрической части
1	4	16	3,6	XIXII
2	2	22	1,8	XII

Примечание: I - кольцевой слой, X - двойной спиральный слой.

Как показано в работе [40], в равнонапряженном днище баллона давления условие прочности в осевом направлении автоматически обеспечивает прочность днища в кольцевом направлении. Однако цилиндрическая часть баллона должна быть усилена кольцевыми слоями, суммарная толщина которых определяется из условия прочности цилиндрической части в кольцевом направлении, т.е.

$$\sigma_T h_M + \bar{\sigma}_1 \sum_{i=1}^2 h_{ai} \sin^2 \varphi_{ai} + h_k \bar{\sigma}_1 = \bar{p} a \quad (3.13)$$

Подставляя найденные выше параметры и определяя толщину кольцевого слоя, найдем $h_k = 8,06$ мм. При толщине элементарного слоя 0,3 мм число кольцевых слоев составляет 27, что соответствует суммарной толщине кольцевых слоев $h_k = 8,1$ мм. Таким образом, условие прочности цилиндрической части баллона в кольцевом направлении обеспечено.

Контур днища рассматриваемого малогабаритного корпуса строился в результате численного интегрирования уравнений в пределах толщины оболочки и исследовано в работе [11], где установлено, что рациональным является совмещение теоретического контура с меридианом срединной поверхности днища.

Поскольку в оболочке, сечение которой показано на рис.3.28, меридиан срединной поверхности имеет достаточно сложную форму, при проектировании малогабаритного корпуса предполагалось, что теоретический контур совпадает при $r < b$ с пунктирной линией, показанной на рис.2.11, а при $r > b$ - с меридианом наружной поверхности первого слоя.

Используя проектные параметры днища корпуса: три толщины h_{ai} и два угла армирования φ_{ai} при $r = a$ и подставляя известные величины σ_T , h_M , \bar{p} и a , в формулы, полученные в разделе 2.5.2, и используя для моделирования программный комплекс ANSYS проведем исследование намотки двух корпусов.

В результате исследования необходимо определить минимальную величину параметра массовой эффективности при двузонной намотке днища.

Для моделирования малогабаритных корпусов задаемся следующими допущениями:

- намотка корпусов выполняется стеклонитью ЕС-7х34-80(3);

- внутренне давление 20,4 МПа.
- моделируем малогабаритный корпус с днищем, выполненным однозонной и двузонной намоткой.

Корпус с однозонной замоткой днища выполняем по расчётной схеме на рис. 3.30. В нашем случае мы будем членить оболочку на зоны, границы которых определяются заданными углами армирования: 90° (на полюсном отверстии), $70^\circ, 50^\circ, 30^\circ, 20^\circ, 15^\circ$ (на цилиндрической части) градусов. При этом угол армирования в пределах каждой зоны примем равным среднему арифметическому углов на границах.

Зная закон изменения ориентации арматуры, можно определить толщину пакета (рис.3.29) для произвольной точки образующей - она будет зависеть от радиуса и угла армирования, подчиняясь уравнению

$$h = ah_a \cos \varphi_a / \sqrt{r^2 - r_0^2} \quad (3.13)$$

где h - толщина оболочки и φ_a - угол армирования на экваторе при $r = r_a$.

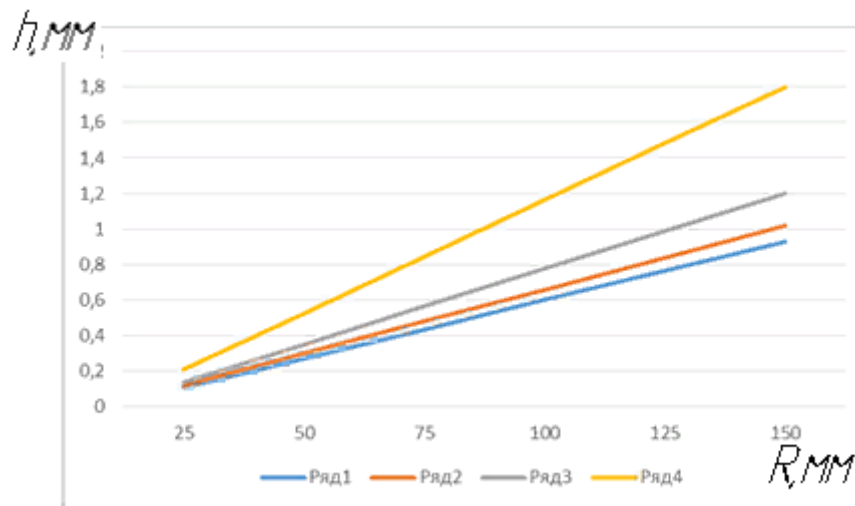


Рисунок 3.29. Толщина пакета КМ в зависимости от радиуса днища малогабаритного корпуса

Ряд 1- 30° , ряд 2- 45° , ряд 3- 60° , ряд 4- 90°

Данная зависимость неприменима вблизи полюсного отверстия, поскольку рассчитанная с ее помощью толщина стремится к бесконечности. Абстрагируясь

от подробностей, требующих специального анализа, получаем профиль сечения вблизи отверстия простой интерполяцией из «достоверной» зоны.

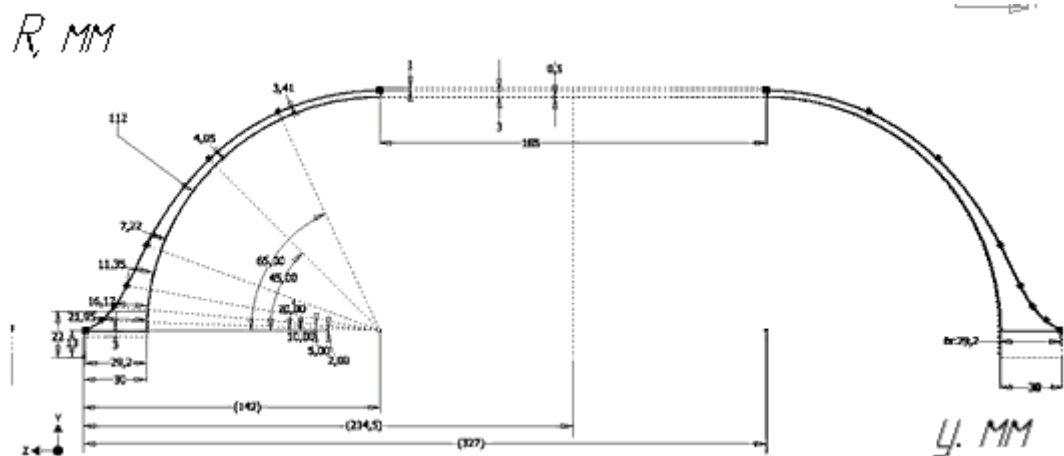


Рисунок 3.30. Расчётная геометрическая схема намотки корпуса с однозонной намоткой днища

При такой расчётной схеме характер распределения эквивалентных напряжений показан на рис. 3.31

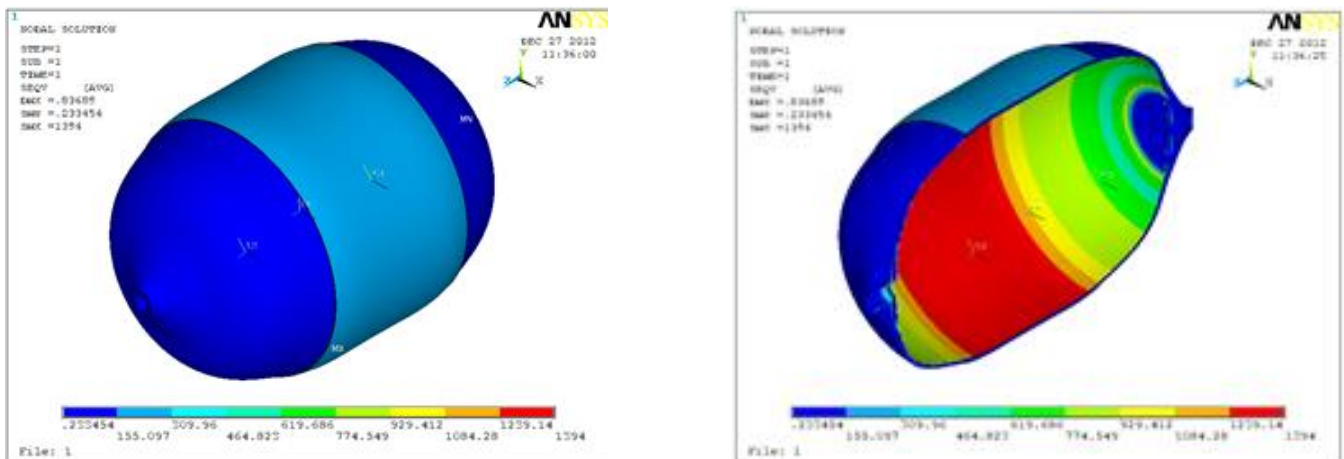


Рисунок 3.31. Характер распределения эквивалентных напряжений для корпуса с однозонной намоткой днища

Напряжения в зоне перехода от цилиндрической части к днищу составили 115,0 МПа.

Непосредственно поле распределения эквивалентных напряжений в районе днища показано на рис. 3.32. Где можно рассмотреть три зоны присутствующих напряжений. Зона 1 - возникающие напряжения на пере закладного фланца, зона

II – напряжения, возникающие в толщине спирального слоя и зона III – напряжения, возникающие в переходной части между кольцевыми и спиральными слоями (наиболее опасные).

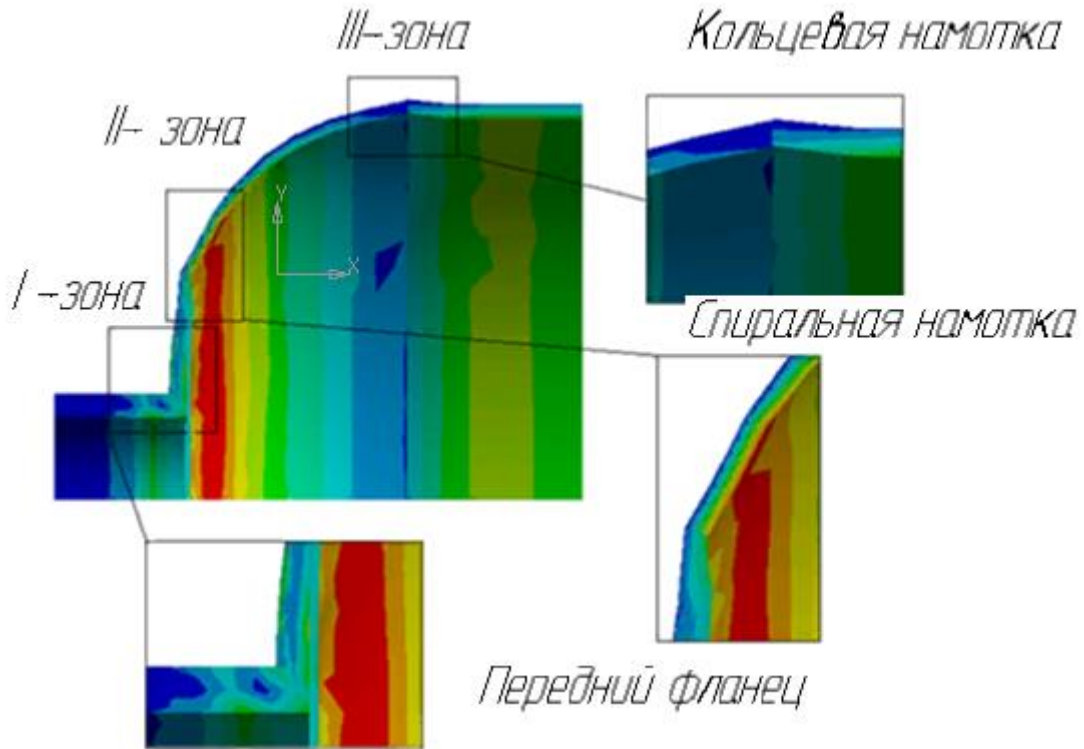


Рисунок 3.32. Поле распределения эквивалентных напряжений в районе дна

При этом, распределение числовых значений деформаций $d(R)$ по дну и центральной части малогабаритного корпуса диаметром 135 мм при однозонной намотке показано на рис. 3.33.

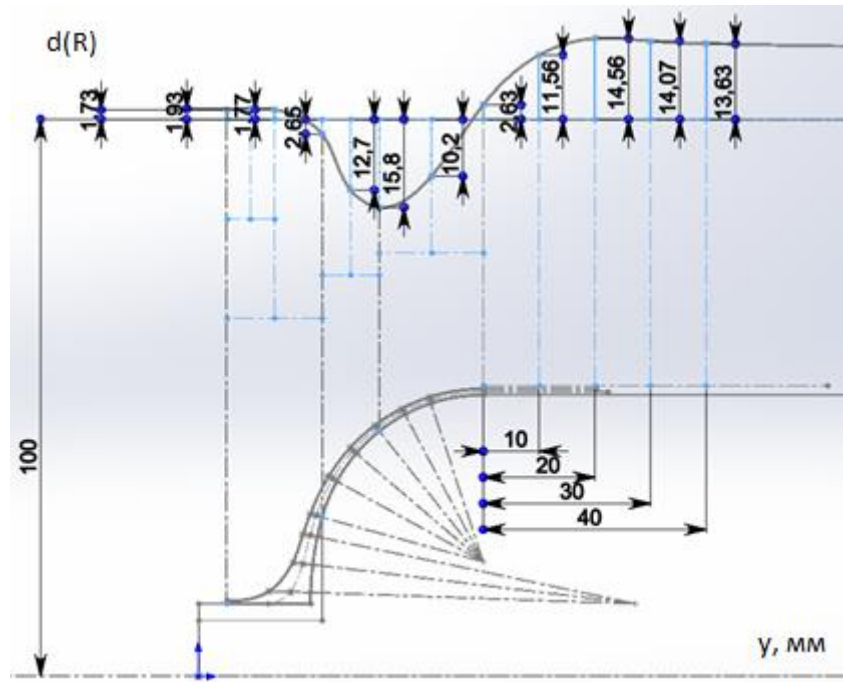


Рисунок 3.33. Распределение значений деформаций $d(R)$ по дну и центральной части малогабаритного корпуса

Исследуем корпус, намотанный по расчётной геометрической схеме на рис. 3.34 с двузонной намоткой дна.

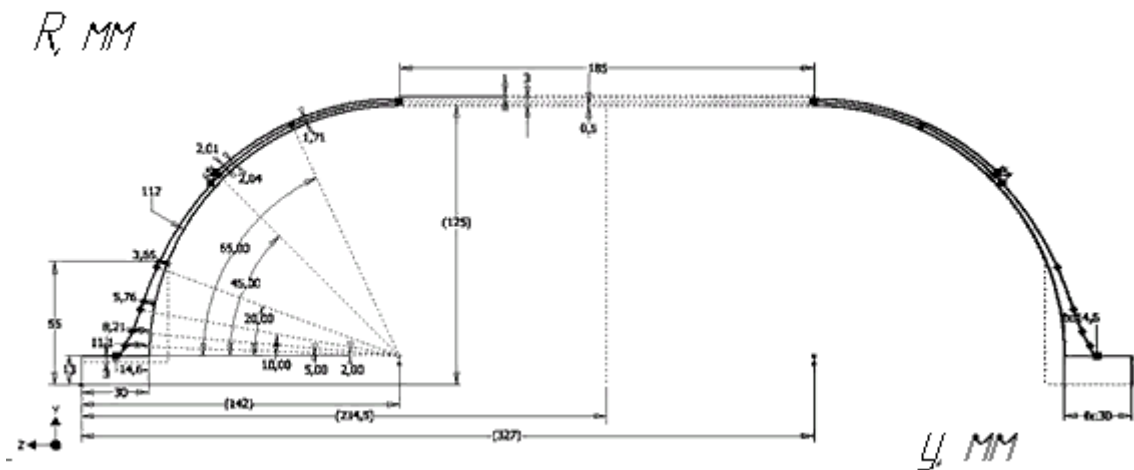


Рисунок 3.34. Расчётная геометрическая схема двузонной намотки дна

При такой расчётной схеме характер распределения эквивалентных напряжений показан на рис. 3.35.

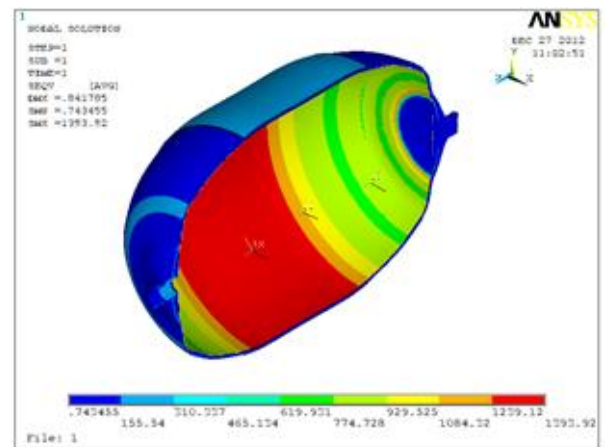
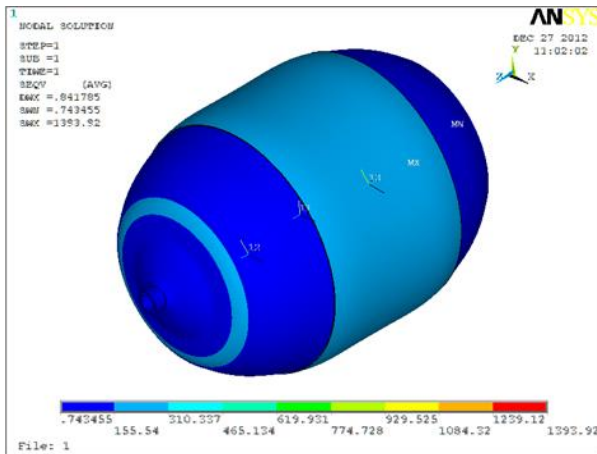


Рисунок 3.35. Характер распределения эквивалентных напряжений для корпуса с двухзонной намоткой днища

Напряжения в зоне перехода от цилиндрической части к днищу составили 140,0 МПа.

Распределение значений деформаций $d(R)$ по днищу и центральной части малогабаритного корпуса диаметром 135 мм при двухзонной намотке показана на рис. 3.36.

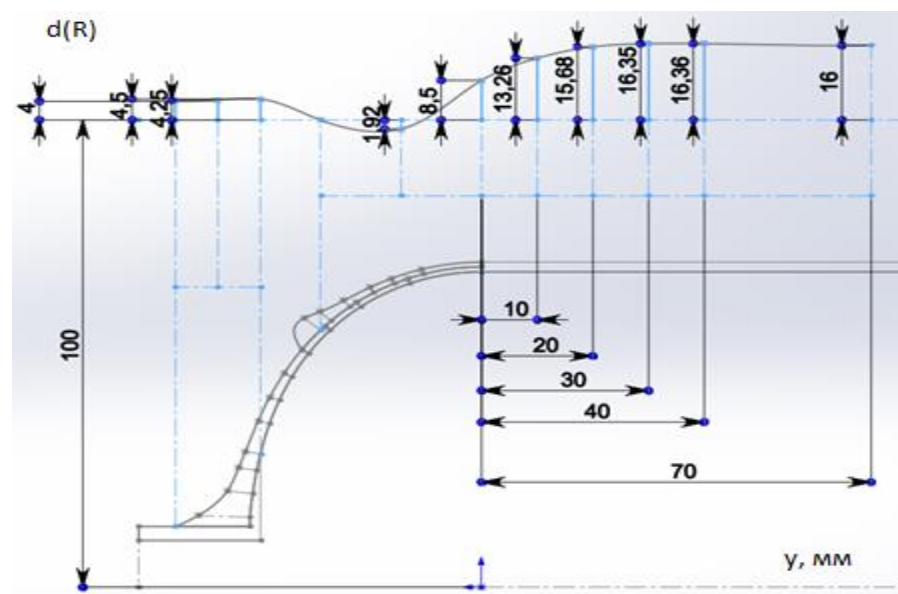


Рисунок 3.36. Распределение значений деформации $d(R)$ по днищу и центральной части баллона

Сравнивая графики деформаций $d(R)$ можно отметить, что при переходе к двум зонам намотки днища, радиальные напряжения в этой части

малогабаритного корпуса снижаются, что в свою очередь приводит к снижению деформаций в переходной части намотки малогабаритного корпуса от кольцевых к спиральным слоям.

По результатам исследования определены массы намотанных малогабаритных корпусов для диаметра оболочки 101 мм и 135 мм (табл.3.7, 3.8).

Таблица 3.7. Масса композитного слоя при изменяемых зонах намотки днища для диаметра лейнера 101 мм

Диаметр 101 мм	количество зон	лейнер	слой [0]	слой [90]	масса
	1		273,450		
Объем, см ³	2	50,678	248,418	58,701	
	3		239,193		
	1		546,900		1062,124
Масса, г	2	397,822	496,836	117,402	1012,060
	3		478,386		993,610

Таблица 3.8. Масса композитного слоя при изменяемых зонах намотки днища для диаметра лейнера 135 мм

Диаметр 135 мм	количество зон	лейнер	слой [0]	слой [90]	масса
	1		1308,800		
Объем, см ³	2	278,200	1092,900	149,370	
	3		1020,500		
	1		2617,600		5100,210
Масса, г	2	2183,870	2185,800	298,740	4668,410
	3		2041,000		4523,610

По значениям, приведенным в таблицах 3.7, 3.8 видно, что с переходом на многозонную намотку днища малогабаритного корпуса масса используемого при намотке композитного материала снижается.

Особенность применения многозонной намотки явно выражено при проектировании и изготовлении малогабаритных баллонов высокого давления где в качестве лейнера используется оболочка, изготовленная из пластика, при намотке которого снижение веса наматываемых композиционных материалов играет большую роль.

3.3. Выводы

1. Разработанное оборудование для пневматического испытания, установка для гидравлического испытания и установка для циклического испытания позволило провести исследования намотанных малогабаритных корпусов на деформационные свойства и общий ресурс.

2. Исследования по изменению шага намотки армирующего материала в кольцевом слое малогабаритного корпуса показали, что он не влияет на деформационные свойства оболочки, при этом погрешность в вычислениях и экспериментальных значениях составила 15%.

3. При исследовании изменений массового совершенства малогабаритных корпусов и эквивалентных деформаций от степени комбинирования намотки кольцевого слоя было выявлено, что параметры достигают минимальных значений при различных уровнях K и m , что свидетельствует о необходимости выбора компромисса между массой и ресурсом баллона.

4. Намотка малогабаритных корпусов двумя зонами позволило получить равномерное распределение значений деформации в переходной части между дном и центральной частью малогабаритного корпуса, при этом критерий массового совершенства малогабаритного корпуса увеличился в 1,5 раза.

РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАМОТКИ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ НА ОСНОВЕ НАНОМОДИФИКАЦИИ МАТРИЦЫ

4.1. Технологическое обеспечение намотки малогабаритных корпусов на основе наномодификации эпоксидной матрицы

4.1.1. Исследование и идентификация наномодификаторов эпоксидной матрицы

Как было указано в главе 1, в качестве наномодификаторов наиболее часто используют астралены, фуллерены а, именно, их особенность развитой поверхности, за счет свободных π -электронов. Поэтому для исследования выбраны модификаторы с различной структурой: нанотрубки «Таунит», ультрадисперсный алмазографитный порошок (УДАГ), графит технический, шунгит и пирогенный нанокремнезём (аэросил).

Для изготовления наномодифицированного ПКМ и прогнозирования его свойств необходима идентификация структуры и дисперсности самого наномодификатора. Самый распространенный метод исследований структуры - рентгеноструктурный анализ. При этом рентгенограммы получены на дифрактометре ДРОН-И в интервале углов $10-70^{\circ}$, излучение CuK_{α} , (1,5406 Å) а микроструктура образцов-свидетелей на микроскопе типа POLMI.

Идентификация образцов проводилась с использованием таблиц [94]. Расчет межплоскостных расстояний (d) определяли по уровню Вульфа-Брэгга:

$$2 \sin \theta = \frac{\lambda}{d}, \quad (4.1)$$

Дисперсность порошков была рассчитана по формуле:

$$\beta = \xi \lambda / D \times \cos \theta, \quad (4.2)$$

где θ - углы отражения «у подошвы»;

D - средний размер кристаллитов;

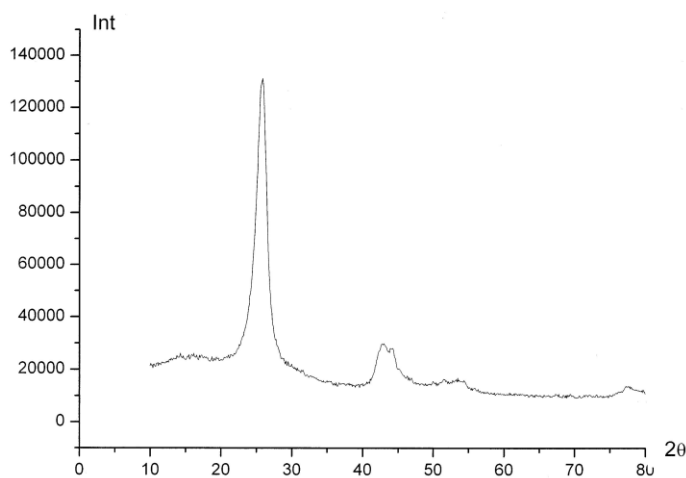
ξ - множитель, учитывающий форму частиц и индексы отражающей плоскости, так как диапазон изменений от 0,98 до 1,39, на практике принято считать $\xi=1$.

β - интегральная ширина, $\Delta 2\theta = 2\theta_2 - 2\theta_1$.

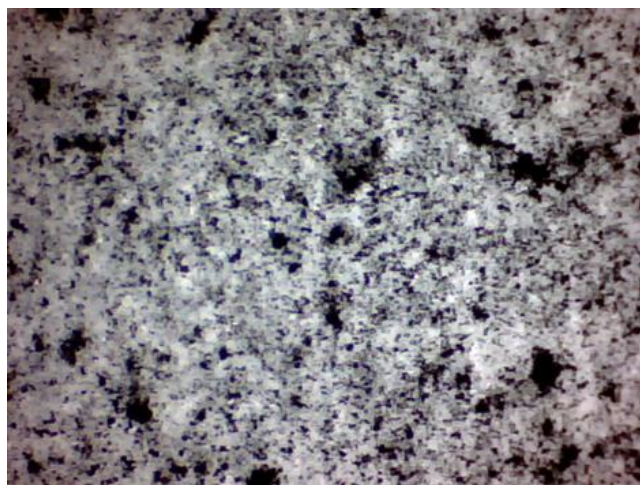
Данные размеров кристаллов, рассчитанные по уширению линий методом Шеррера [119] на рентгенограмме удовлетворительно совпадают с данными электронной микроскопии.

Идентификация модификаторов по рентгенограммам показала следующее:

а) «Таунит» (рис.4.1) - углеродные нанотрубки, представляют собой одномерные наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита в виде сыпучего порошка чёрного цвета. Гранулы микрометрических размеров имеют структуру спутанных пучков многостенных нанотрубок [119].



а



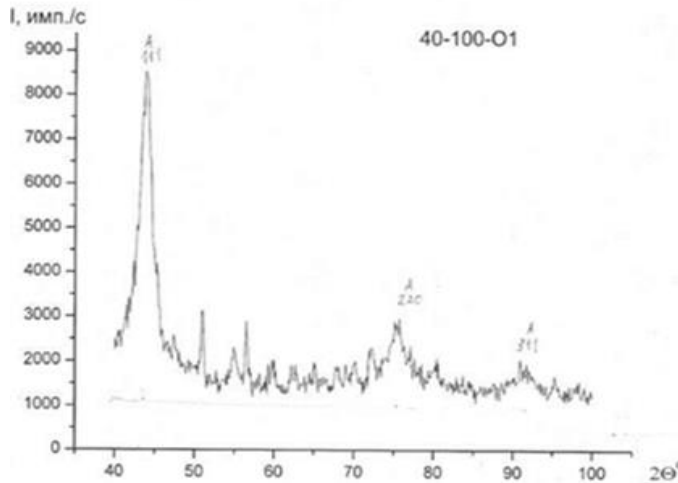
б

Рисунок 4. 1. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) углеродных нанотрубок «Таунит»

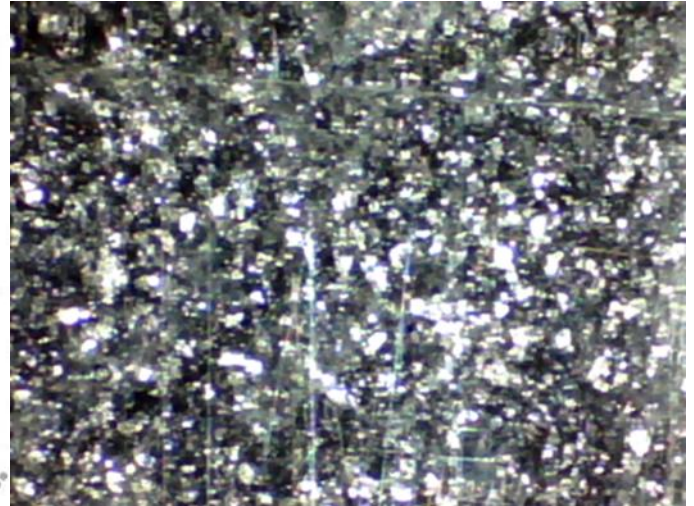
б) ультрадисперсный алмазографитный порошок (УДАГ) (рис.4.2) содержит две кристаллические структуры углерода - алмазную и графитовую. Соотношение алмазной и графитовой составляющей примерно 4:1.

Дисперсность составила 5-10 нм, что согласуется с данными работы [23].

в) графит технический ГС-4 (ГОСТ 17022-81) [23], выпускаемый промышленностью Украины, имеет ту же кристаллическую структуру, что и «Таунит» (рис. 4.3).

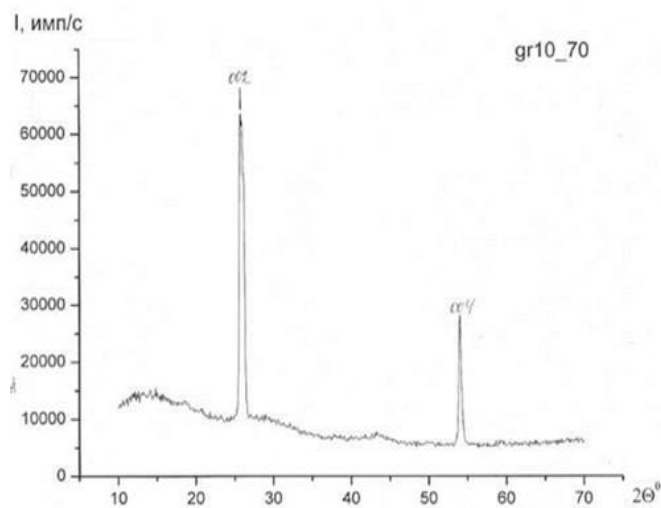


а

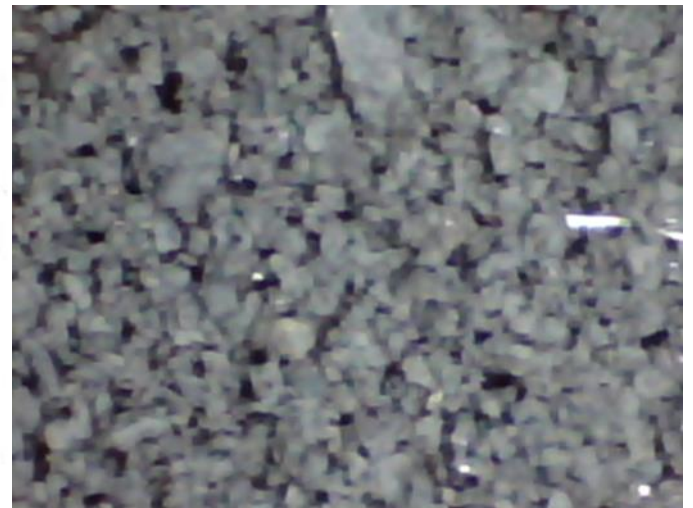


б

Рисунок 4. 2. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) нанонаполнителя УДАГ



а



б

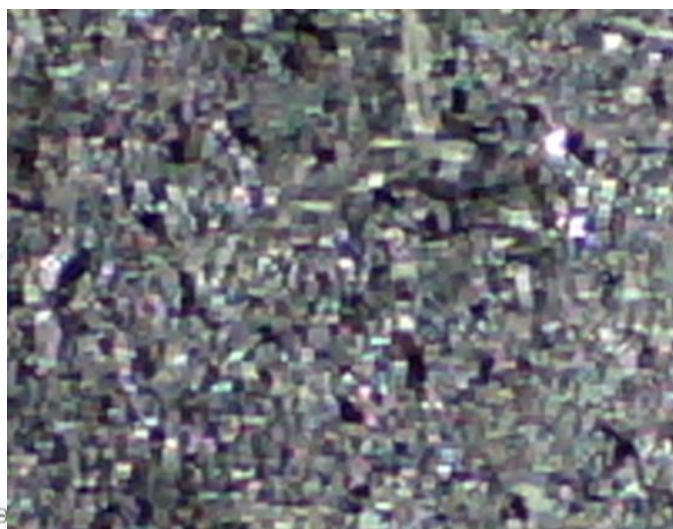
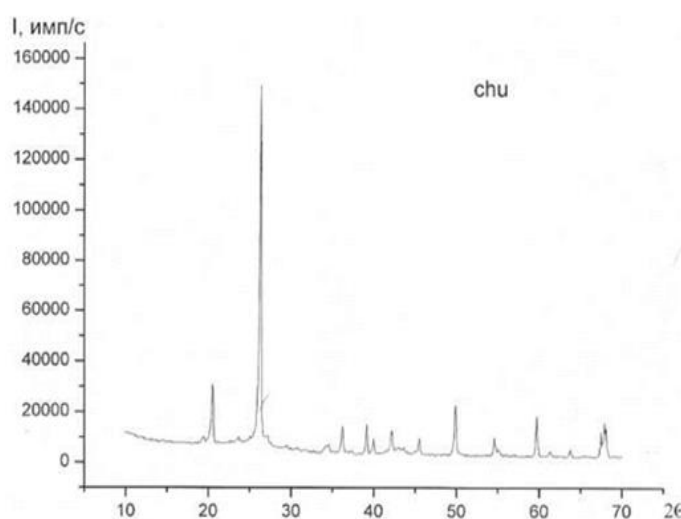
Рисунок 4.3. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) нанонаполнителя графит технический ГС-4

г) природный материал шунгит (рис.4.4), содержит от 30 до 70% углерода в форме графита. Материал текстурирован с чётко выраженной ориентацией графита по плоскости 002; 004 и содержанием SiO_2 более 50%.

Сравнивая дифрактограммы (рис. 4.3 и рис.4.4) шунгит, в отличие от графита технического ГС-4, имеет значительное количество примесей табл. 4.1.

Таблица 4.1. Количество примесей в шунгите, %

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	S	C	H_2O крис.
57,0	0,2	4,0	2,5	1,2	0,3	0,2	1,5	1,2	30,0	1,7



а

б

Рисунок 4.4. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) нанонаполнителя природного шунгита

д) на рентгенограмме аэросила А-300 (ГОСТ 14922-77) [24], (рис.4.5) отчетливо индицируются рефлексы от плоскостей 101: 112: 100 что соответствует кристаллической структуре SiO_2 гексагональной модификации. Примесные линии не идентифицировались. Дисперсность порошков до 5 нм.

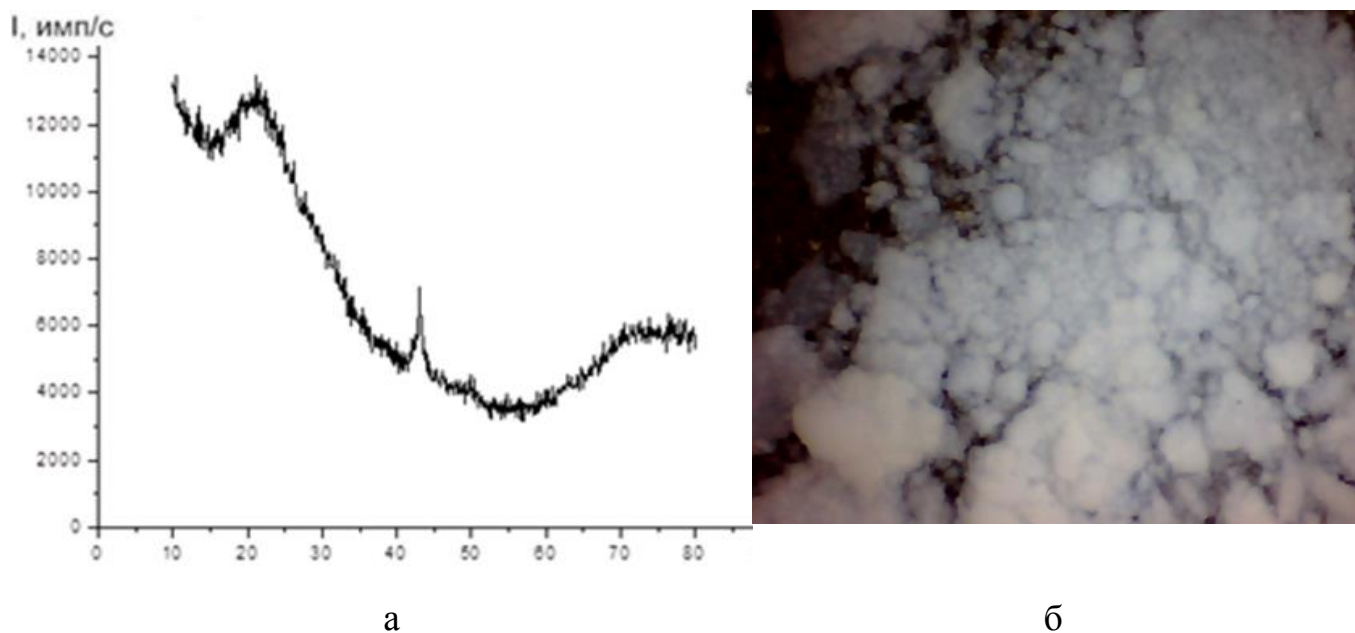


Рисунок 4. 5. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) аэросила А-300

На основе проведенной идентификации составляем классификатор наномодификаторов по дисперсности (табл. 4.2).

Таблица 2.1. Классификатор наномодификаторов эпоксидной матрицы.

№	Наименование, тип модификатора	Дисперсность, Нм
1.	Углеродные модификаторы	
	Графит технический	1000
	Углерод	50-100
	Ультрадисперсный алмазографит (УДАГ)	50-300
2.	Нанокуглеродные модификаторы	
	Нанотрубки «Таунит»	5-100
	астралены	5-100
	фуллерены	5-100
3.	Кремний содержащие модификаторы	10-100
	Монтмориллонит (глина)	
	Аэросил	50-300
4.	Шунгит	
	Содержащий как С, так и Si	50-500
5.	Оксиды металлов	
	Al ₂ O ₃ , ZnO, ZrO ₂	10-100

Проведенное сравнение изученных модификаторов по дисперсности (5-100 нм), удельной поверхности (τ) и удельной плотности (ρ) показало, что их можно использовать как наномодификаторы для дальнейших исследований и прослеживания количественного и качественного влияния модификатора на физико-химические свойства наномодифицированного материала на основе эпоксидного компаунда.

4.1.2. Разработка технологических режимов получения наномодифицированных полимерных композитов

Для поиска оптимальных режимов получения наномодифицированных полимерных композитов были выбраны полимерные материалы на основе эпоксидной смолы, модифицированные: а) «Таунитом»; б) ультрадисперсным алмазным порошком; в) техническим графитом; г) шунгитом и д) аэросилом.

Эпоксидные смолы - это продукты поликонденсации эпихлоргидрина с полиатомными фенолами. Активными группами, участвующими в процессе полимеризации, в данном случае образования сетчатой структуры при введении отвердителя являются активные группы: эпоксидная $\text{CH}(\text{CH}_2)\text{O}$ и гидроксильная (ОН).

Отвердителем служил гексаметилендиамин - $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_6\text{NH}_2$.

Согласно литературным данным [29] наибольший эффект ПКМ получали при соотношении матрица-модификатор 100: (1-10) вес %. Для выяснения механизма взаимодействия матрицы с модификатором были изготовлены серии образцов свидетелей с содержанием модификаторов от 1 до 20 % (табл.4.3).

Таблица 4.3. Соотношение матрица: модификатор

Модификатор	На 100 вес % матрицы							
	1	2	3	4	5	6	10	20
«Таунит»		+			+			
Ультрадисперсный алмазный порошок		+			+		+	+
Технический графит	+	+	+	+	+	+	+	+
Шунгит	+	+	+	+	+		+	+
Аэросил	+	+	+	+	+			

Образцы-свидетели, представляющие собой прямоугольные призмы с размером поперечного сечения 5x5 мм и длиной 25 мм изготавливались по следующей технологии.

Соответствующий наномодификатор вводили в отвердитель ТЭАТ (ТУ 6-09-11-2119-93), тщательно перемешивали и выдерживали при температуре $t=120^{\circ}\text{C}$ до прекращения выделения пузырьков воздуха. После чего, соединяли с матрицей - эпоксидной смолой ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) и отверждали.

Отверждение образцов проводили по режимам:

- на воздухе ($20-40^{\circ}\text{C}$) 6 часов;
- на воздухе ($20-40^{\circ}\text{C}$) 2 часа + 5 часов при температуре 120°C .

Об изменении в структуре наномодифицированного ПКМ судили по изменению интенсивности линий на рентгенограммах (рис. 4.7-4.9) сравнивая полученные значения с приведенной рентгенограммой (рис. 4.6) полимерного композита без наномодификаторов. При этом максимумы значений указывают на стабильную структуру ПКМ с расстоянием 4,52 А между блоками.

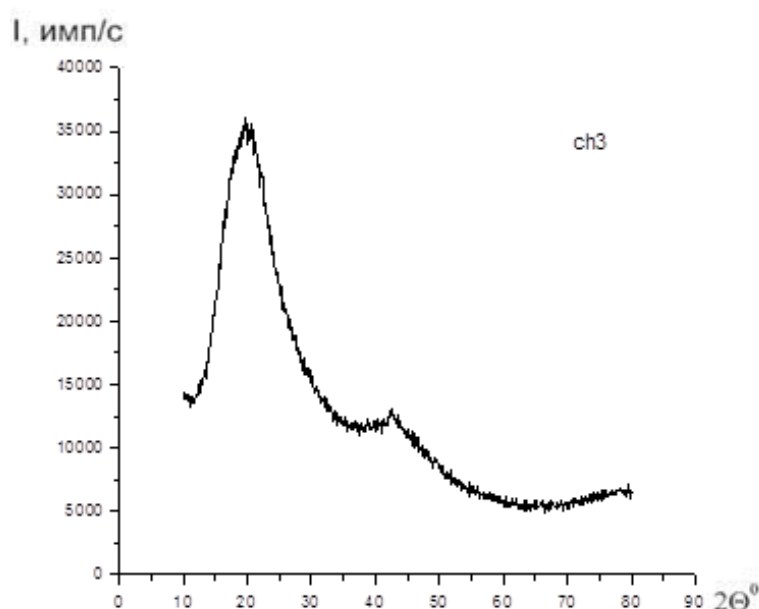


Рисунок 4.6. Дифрактограмма эпоксидного композиционного материала без модификаторов

Введение наномодификатора аэросил до 5% не приводит к изменению основного расстояния в структуре матрицы, но снижает её интенсивность. Вероятно, дисперсность SiO_2 позволяет внедриться в сетчатую структуру матрицы

(рис.4.7). Такой же эффект наблюдается при введении 2% алмазного порошка (рис.4.8).

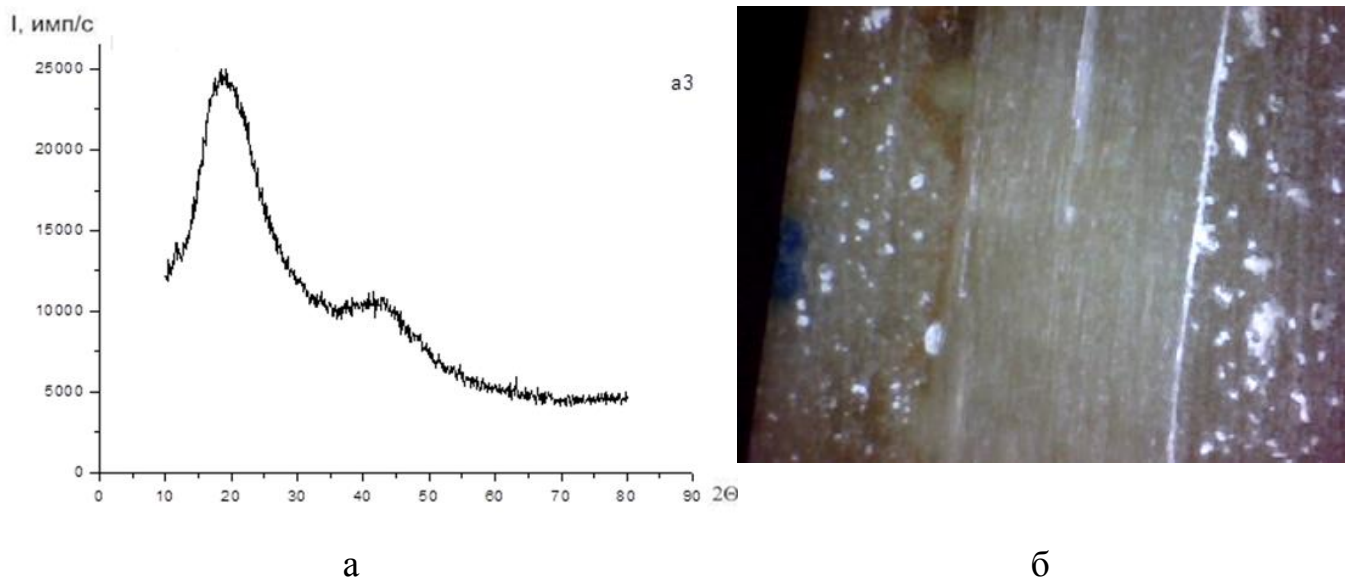


Рисунок 4.7. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) эпоксидного композиционного материала+3% аэросила.

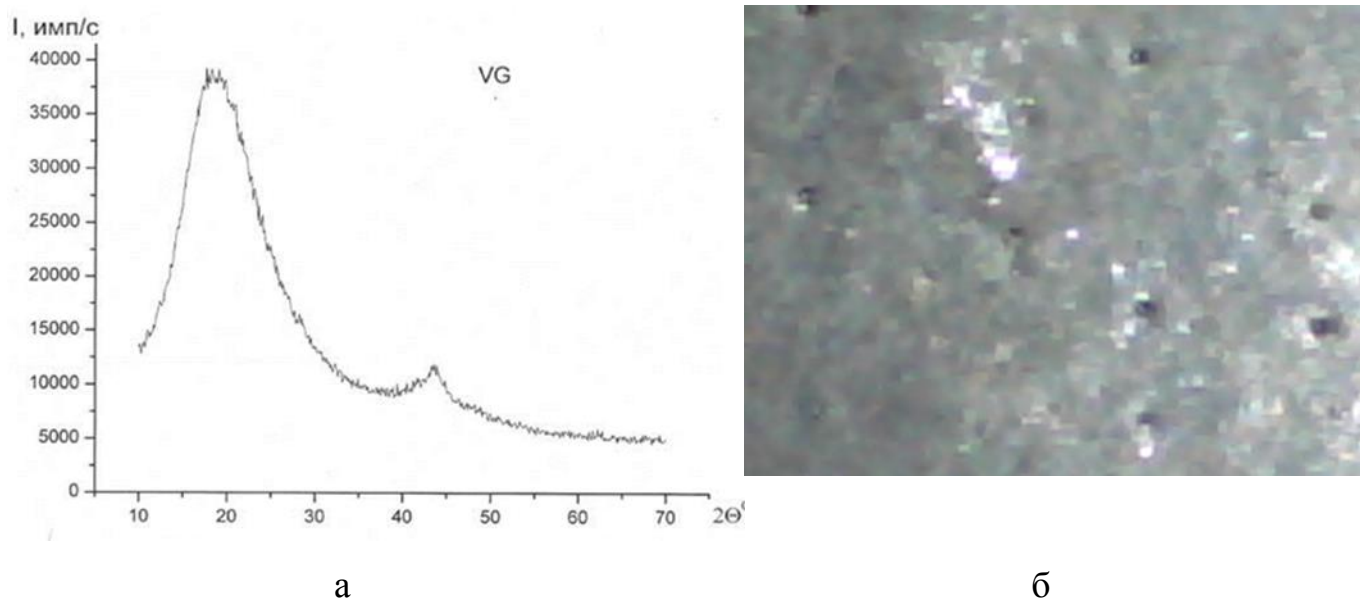


Рисунок 4.8. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) эпоксидного композиционного материала + 2% ультрадисперсного алмазного порошка.

Модификаторам шунгиту и техническому графиту уделено особое внимание, т. к. механизм взаимодействия углеродных наполнителей с эпоксидной матрицей до конца не выяснен (рис.4.9, 4.10).

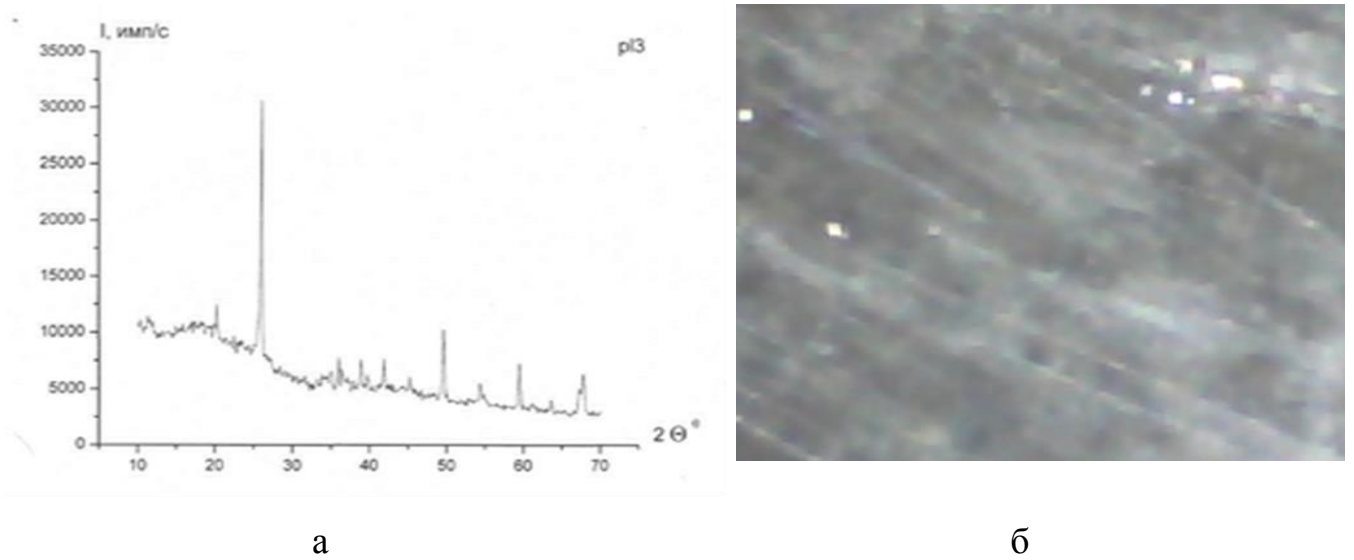


Рисунок 4.9. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) эпоксидного композиционного материала+ 3% шунгита

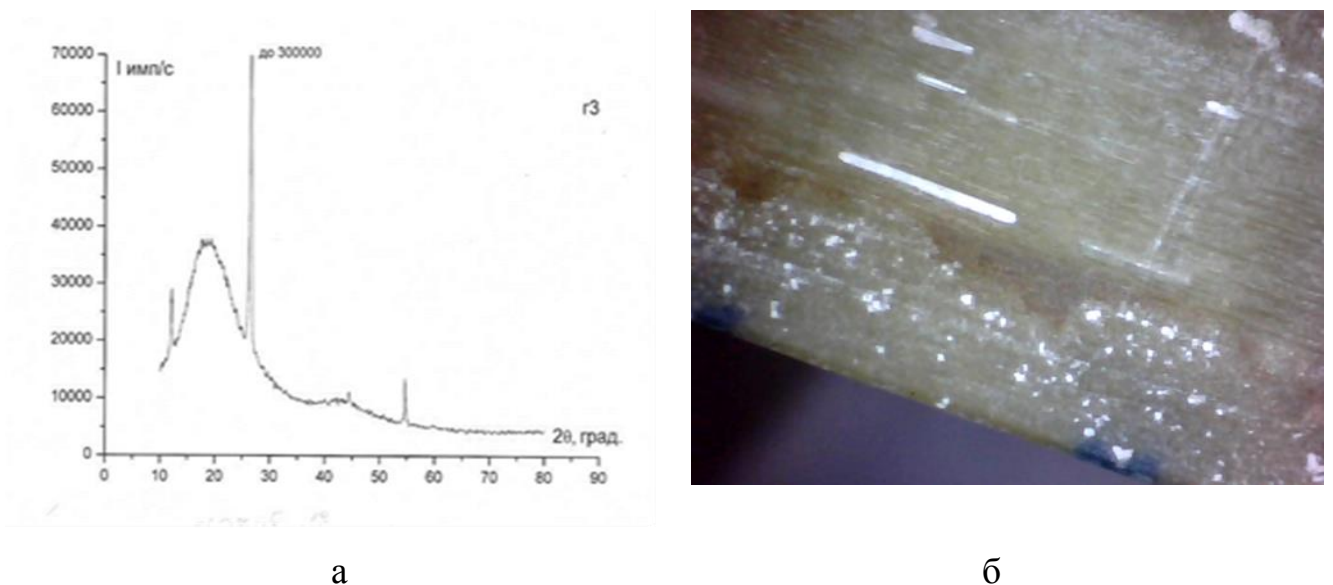


Рисунок 4.10. Дифрактограмма (а) и микроструктура (б) эпоксидного композиционного материала+ 3% технического графита

Анализ рентгенограмм серий образцов, наномодифицированных шунгитом (рис. 4.9) и техническим графитом (рис. 4.10) показывает значительное изменение в структуре полимера.

Изменение интенсивности максимумов, характеризующих структурируемые блоки и расстояния между ними в полимере, находится в зависимости от количества вводимого модификатора.

На основе рациональных режимов получения модифицированных полимерных композитов был разработан механизм взаимодействия наномодификаторов с полимерной матрицей.

4.1.3. Разработка механизма взаимодействия наномодификаторов с полимерной матрицей

Механизм взаимодействия модификаторов с полимерной матрицей рассматривался: а) на молекулярном уровне и б) пути влияния структуры на физико-механические свойства нанокompозитов.

В органических соединениях существуют, кроме прочных химических связей, водородные связи как в самих молекулах, так и между цепями или блоками молекул.

Учитывая, что в ПКМ на основе эпоксидной матрицы ЭД-20 (с отвердителем типа ПЭПА) имеются метиленовые мостики, разделяющие ароматические ядра и нарушающие сопряжения в полимерах, ухудшая их физико-механические свойства, и ароматические циклы с гетероатомами O, N, имеющими на внешних орбитах неспаренные электроны, взаимодействующие с π -электронами бензольных ядер и, следовательно, улучшают сопряжения.

Молекула эпоксидной смолы кроме указанных активных групп – эпокси и гидроксильной имеет ароматические ядра с π – сопряженными связями и двойные и одинарные C-H связи.

При введении отвердителя происходит образование сеток, блоков величина которых определяется различными условиями проведения эксперимента

(температура смолы, отвердителя, нарушение стехиометрического соотношения смола: отвердитель, режимов отверждения). А именно, величина блоков, совершенство структуры и определяет механические свойства композиционного материала. Определить степень полимеризации можно путем инфракрасной спектроскопии.

Отверждение молекулами, содержащими аминные группы приводит к изменению линий валентных колебаний C=N их смещению, изменению интенсивности и появлению новых линий [60].

Для уменьшения хрупкости, увеличения пластичности и водостойкости эпоксидных полимеров вводят минеральные добавки. Силикаты имеют жёсткую пространственную структуру при соотношении матрица: силикат 100:5-25%. Такой механизм взаимодействия представляет научный интерес. Полученный эпоксиминеральный продукт характеризуется следующей молекулярной структурой: в ИК-спектре уменьшается интенсивность полос 870 и 920 см^{-1} (деформационные колебания C^{c}); увеличивается интенсивность полосы 1420 см^{-1} (деформационные колебания CH_2 в $\text{CH}_2 - \text{CO}$ эпоксидной группе), что свидетельствует об уменьшении количества эпоксидных групп в композиции и связано с раскрытием $\text{CH}_2 - \text{CO}$ цикла. Особый интерес представляет полоса поглощения 1100 см^{-1} ; которую можно интерпретировать как образование новой связи Si-O-C и полоса в области 3400 см^{-1} показывающая увеличение концентрации OH⁻ группы, участвующих в образовании внутримолекулярной связи.

Эти данные можно использовать в технологическом процессе при введении полисиликатного модификатора (аэросила) непосредственно в матрицу и соответственно оптимизировать технологический процесс.

Механизм взаимодействия эпоксидной смолы с силикатами показал незначительное влияние SiO_2 на электронную структуру молекул композита. Это объясняется отсутствием «свободных» электронов на устойчивой структуре силиката.

Введение модификаторов на основе углерода используется для придания эпоксидным композитам целого ряда улучшенных характеристик, таких как электропроводность и теплопроводность.

Углеродные материалы, как искусственно выращенные, а также полученные путём термического разложения углеводородов, так и природные (шунгит) в своей основе содержат графитовую структуру углерода.

Она характеризуется наличием «свободных» электронов, которые могут создавать гибридное π – сопряжение с электронами молекул смолы и отвердителя.

Необычная электронная структура фуллеренов объясняется наличием большого количества слабосвязанных и делокализованных валентных электронов. В работе [61] приведены данные об электронной структуре фуллеренов - над поверхностью фуллеренов происходит перекрытие P_z - орбиталей атомов углерода с образованием π - полос, регистрируемых рентгеновской эмиссионной спектроскопией.

Электронная структура графита известна, она такая же в слоях Sp_2 гибридизация атомов углерода и P_z орбитами образуют над слоями π – сопряженные связи (боковое перекрытие P_z орбиталей).

Рассмотрение электронной структуры молекулы эпоксидной смолы показывает, что эпокси группа и группа ОН после введения отвердителя не являются активными. В электронном взаимодействии могут участвовать лишь неспаренные электроны азота отвердителя.

Количественно соотношение смола: отвердитель: модификатор было оценено по результатам эксперимента.

По известным методам [62] в эпоксидную смолу ЭД-20 вводили различные модификаторы: алмазный порошок (А), шунгит (Ш), графит (Г) в количестве 2-10 вес %.

Нами определено оптимальное соотношение атомов азота в ГМДА 30%, т.е. соотношение ЭД: ГМДА: модификатор – 100: 13: 4.

При таком соотношении «работают» неспаренные электроны азота, образуя сопряжение π – электронов азота с π – электронами углерода. Эксперимент

показал изменение электропроводности ПКМ на 3 порядка без изменения структуры полимера, если количество наномодификатора в пересчёте на углерод не превышало 4%.

Дальнейшее увеличение вводимого модификатора приводит к снижению электропроводности. Вероятно, это ухудшает π – сопряжение активных групп, что подтверждается изменением структуры полимера (см. приложение).

Таким образом, на основании литературных и экспериментальных данных был предложен механизм взаимодействия углеродных наномодификаторов с полимерной матрицей на молекулярном уровне, а именно образование систем π – сопряжения электронов углерода в модификаторе с неподелённой парой атомов азота в матрице [120].

Автор [57], исследуя прочностные характеристики эпоксидно-аминных полимеров, делает вывод о неоднородности структурообразования - наличия сеток с незавершенной фазовой сегрегацией. Образование топологичных дефектов и появление сеток с большей молекулярной массой, способствует увеличению прочности.

Авторы [63] подробно описали влияние ZrO_2 на прочностные характеристики эпоксидного компаунда. Экстремальную зависимость $\sigma_{сж}$ от количества модификатора объясняют деформационными изменениями структуры.

Наночастицы проявляют тенденцию к образованию агрегатов с размерами до 300 нм и даже агломератов с размерами до 3000 нм. При этом структура агрегата с сильно связанными наночастицами при деформации допускает их поворот и скольжение, на что расходуется энергия развеваящейся трещины, обуславливая повышение прочности материала. Трещина быстро продвигается при малом количестве модификатора, а увеличение количества агрегатов мешает продвижению трещин, реализуя упрочняющий эффект.

Проведя сравнение изученных модификаторов, для дальнейших исследований и прослеживания количественного и качественного влияния модификатора на физико-химические свойства наномодифицированного

материала на основе эпоксидного компаунда были выбраны: графит технический ГС-4 и аэросил А-300

Этот выбор обусловлен сравнительной доступностью этих материалов и возможностью варьировать физико-химические свойства композиционных материалов использованием природных или выпускаемых в промышленных масштабах наномодификаторов благодаря их развитой поверхности, что позволит не увеличивать затраты по сравнению с дорогостоящими фуллереновыми углеродными модификаторами «Таунит».

4.2. Методика технологического процесса намотки на основе наномодифицированного полимерного композита

На основании результатов, полученных в данном исследовании, разработан и опробован технологический процесс намотки малогабаритных корпусов на основе наномодифицированного эпоксидного связующего с различными модификаторами.

Модификация наночастицами способствует улучшению межфазного взаимодействия, усилению адгезии и, как следствие, повышению предельной прочности волокнистого наполнителя в композите. Происходит незначительное увеличение плотности композита с наномодификаторами, это может быть объяснено лишь структурированием материала матрицы.

Важным фактором обеспечения надежности композиционного материала является адгезионная прочность. При научно обоснованном введении наполнителей необходимо комплексно учитывать химическую активность наполнителя и связующего, физико-химические процессы происходящие при полимеризации и температурно-временные характеристики. Это позволяет регулировать эксплуатационные характеристики композита.

Модифицированное связующее (матрица) подвергалась кратковременному до 10 минут облучением ультрафиолетом (УФО) и инфракрасным светом (ИК).

В результате такой обработки олигомера образуются свободные радикалы, которые взаимодействуют с активными центрами дисперсных частиц, что обеспечивает увеличение степени сшивки матрицы во внешних поверхностных слоях и повышает прочность адгезии связующего к стекловолокну в 1,5 -1,8 раза.

Стекло Е вводилось в количестве 1380 г/м², ширина слоя 1200 мм.

Намотка корпуса производилась в условиях, позволяющих удалить воздух, устранить «гофрирование» и регулировать скорость намотки.

Средняя толщина слоя стеклонити при содержании стеклянной составляющей 48%-1,8 мм.

Наиболее часто упрочняют матрицы стекловолокном, хотя при намотке и обработке их прочность теряется до 30 %. Обычно их поверхность обрабатывают, чтобы облегчить связь с матрицей (смолой). В ряде случаев это осуществляется в процессе производства волокна, что повышает его стоимость.

Важным фактором, определяющим специфику получения развитого переходного слоя ПКМ является правильно выбранный порядок введения дисперсных наполнителей (рис.4.11). Перенос наполнителей из фазы в фазу и переход из свободно дисперсного состояния в состояние дисперсности вязкого полимера происходит в процессе механического перемешивания, вследствие чего условия процесса смешивания и порядок введения модификатора являются решающими. В отличие от нанотрубок и фуллеренов исследуемых авторами работ [32] используемые в данном исследовании модификаторы не проявляют склонности к слипанию, кроме графита и не требуют специальной дезинтеграции в растворах и под действием ультразвукового излучения (УЗИ) - обработки.

Природный материал шунгит необходимо было подвергать механическому размолу до дисперсности 5 мкм, что дополнительно активировало его поверхность. Кажущаяся простота технологической схемы для наноуглеродных наполнителей включает ряд специальных операций. Схема технологического процесса намотки малогабаритного корпуса на основе углеродного наномодификатора дана на рис.4.12.

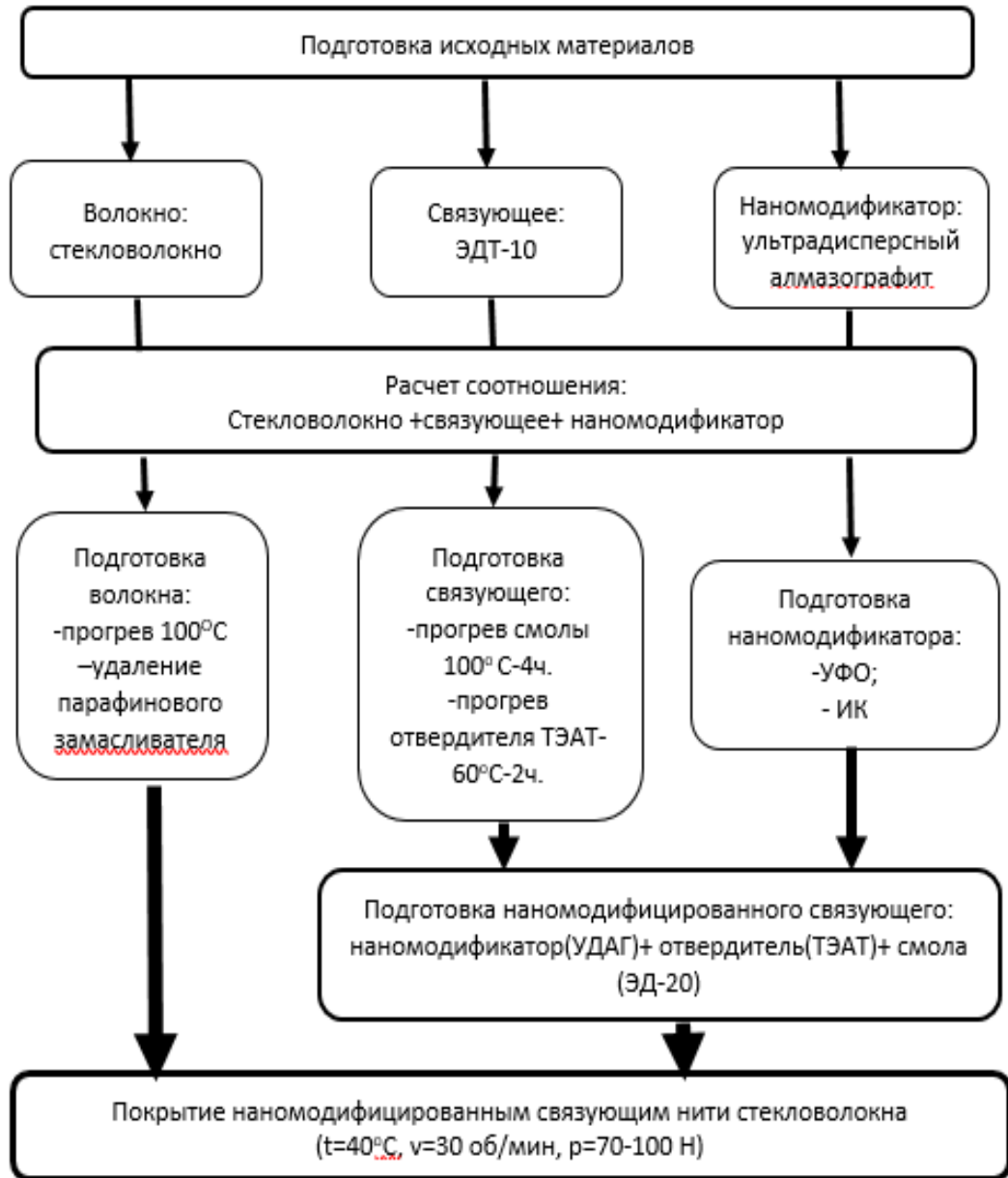


Рисунок 4.11. Технологическая схема введения дисперсных наполнителей

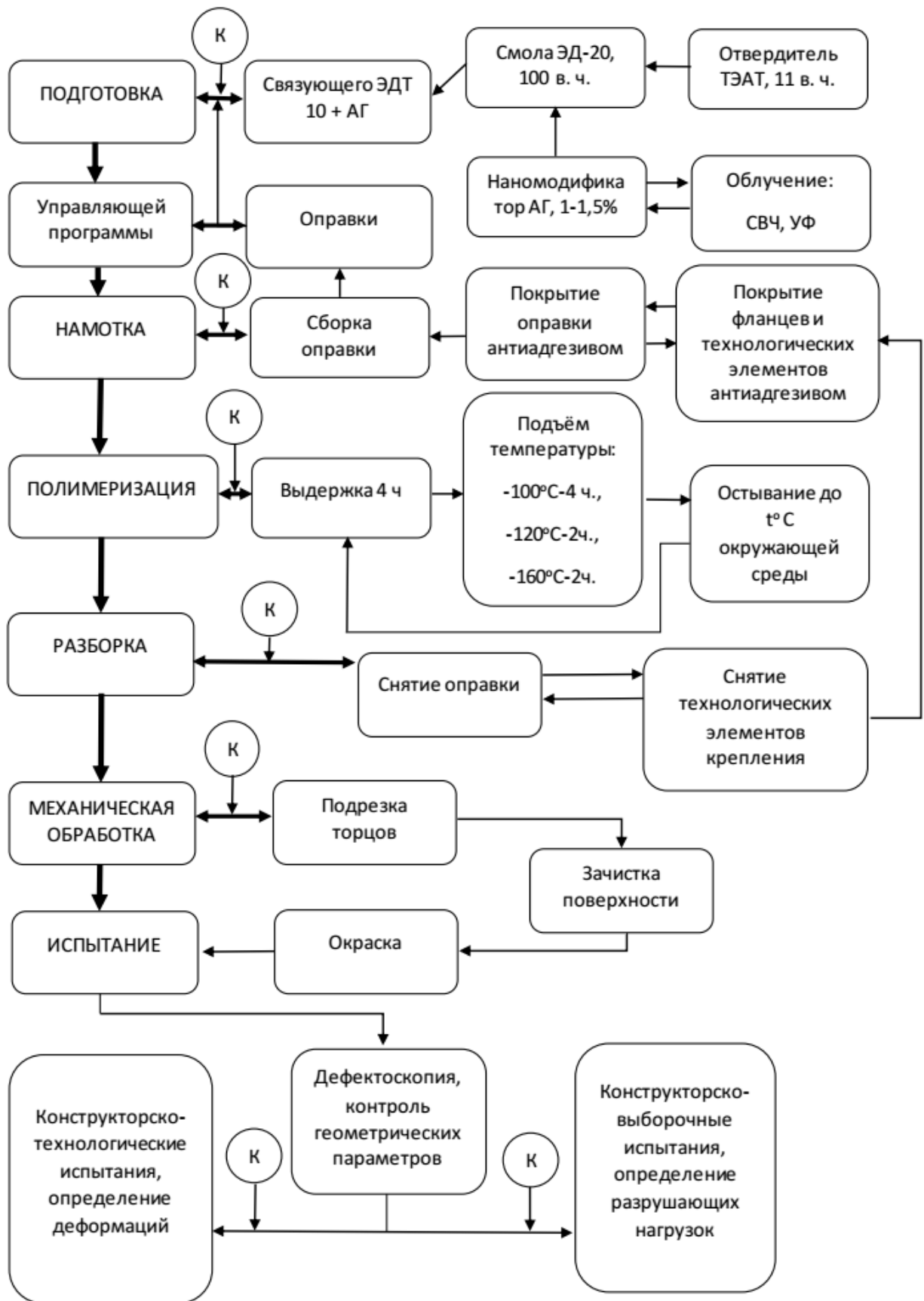


Рисунок 4.12. Схема технологического процесса намотки малогабаритного корпуса на основе углеродного наномодификатора

где К- контроль операции.

При намотке малогабаритного корпуса в автоматическом режиме, слои заданной толщины наносятся на той же скорости, волокно протягивается через ванночку с наномодификатором (препрегом) согласно технологической карте (табл.4.9).

Для повышения адгезии компаунда к поверхности изделий могут использоваться в качестве смачивающих средств силаны различного состава.

Выбор способа нанесения связующего определяется его вязкостью, конфигурацией и размерами склеиваемых поверхностей, используемым оборудованием. Для нанесения пастообразных клеев чаще всего используются шпатели и специальные приспособления (ракли); для низковязких клеев - мягкие кисти, щетки, валики и т.п. При нанесении пленочных клеев их следует тщательно прикатывать к склеиваемым поверхностям.

Если при нанесении компаунда на поверхности склеиваемых изделий в него попадает воздух, это снижает качество соединения. В этом случае целесообразно использовать ультразвуковую обработку.

Параметрами отверждения клеев являются температура, продолжительность и давление склеивания.

Температура отверждения клеев может быть в пределах от 20° С до 315°С. Клеи холодного отверждения можно отверждать и при повышенных температурах, что позволяет сократить продолжительность этого процесса, улучшить смачивание

поверхности клеем, повысить прочность клеевых соединений, но при этом снижается эластичность клея.

При проведении ремонтных работ важным технологическим фактором является давление склеивания, которое определяется типом используемого клея, размером клеевых соединений, качеством их подгонки. Давление не только фиксирует положение склеиваемых поверхностей, но и способствует улучшению

Таблица 4.9. Карта технологических операций

№	Наименование операции	Назначение операции	Технологии операции
1	Сушка смолы	Удаление из эпоксидной смолы воздуха и влаги	Нагреть смолу при температуре 20-160°C до прекращения выделения газовых пузырей(для ускорения процесса рекомендуется применять вакуумирование разогретой смолы)
2	Сушка стекловолкна марки Е	Удаление из стекловолкна воздуха и влаги	Сушка сухим воздухом в процессе намотки
3	Введение наномодификатора	Получение однородной смеси с эпоксидной смолой	а) ввести наномодификатор в разогретую смолу при непрерывном перемешивании в течении 2 часов (магнитная мешалка); б) вакуумировать при остаточном давлении не более 10 мм.рт.ст. до прекращения активного выделения газовых пузырей
4	Введение отвердителя	Получение компаунда в исходном состоянии	а) охладить разогретую эпоксидную смолу с наномодификатором до температуры, близкой к температуре плавления твёрдого отвердителя; б) ввести отвердитель в охлаждённую смолу и осторожно тщательно перемешать; в) вакуумировать при остаточном давлении не более 10 мм.рт.ст. до прекращения активного выделения газовых пузырей
5	Намотка изделия	Пропитка стекловолкна связующим	Стекловолокну проходит через связующее (пропиточный компаунд) при температуре 20-40° С.не ниже 20° С.
6	Нанесение наномодифицированного компаунда	Создание поверхности защитного слоя стеклопластика	<i>Нанесение компаунда</i> на поверхности стеклопластика. При нанесении компаунда необходимо стремиться, чтобы слой был равномерным и имел толщину 0,1-0,2 мм.
7	Отверждение	Сушка	Сушить при температуре не менее 20°C 24 часа.

смачивания клеем изделий и, следовательно, заполнению микронеровностей поверхностей.

Последовательность проведения операций изготовления элементов с наномодифицированными слоями приведена в карте технологических операций (табл. 4.9).

Разработанная технология процесса намотки была применена при изготовлении корпуса маршевого двигателя из ПК с металлическим фланцем (рис. 5.11) и транспортно-пускового контейнера (рис.5.14) на основе наномодифицированного полимерного композитного материала.

4.3. Исследование свойств полимерного композита на основе наномодификации полимерной матрицы

4.3.1. Экспериментальное исследование образцов полимерного композита на адгезионную прочность

Для исследования адгезионной прочности были изготовлены клеевые образцы с различным процентным соотношением «наномодификатор – эпоксидная матрица».

Образцы для испытаний готовились внахлестку по стандартной схеме приложения нагрузок (рис.4.13) [105].

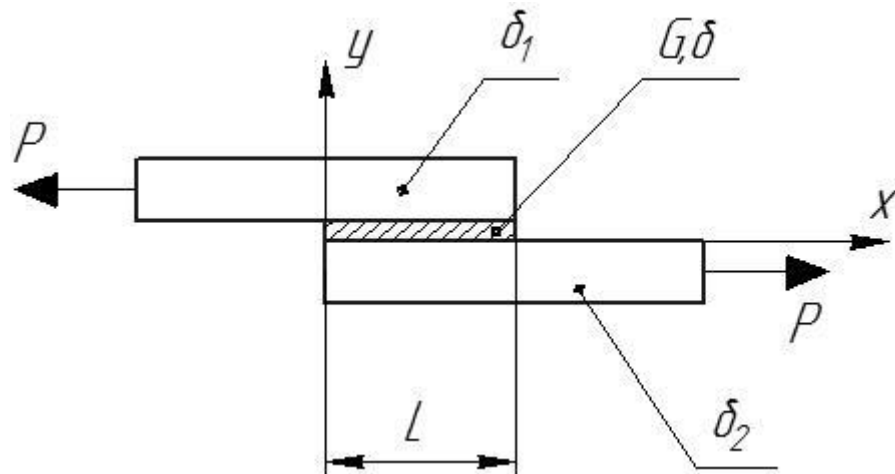


Рисунок 4.13. Схема приложения нагрузок для испытаний

Для проведения испытаний готовились образцы - полоски, вырезанные из стеклопластика на основе стекловолокна и эпоксидного связующего, размерами 110x27x2 мм с различной ориентацией волокон по отношению к продольной оси.

Технология изготовления клеевых соединений образцов из композиционных материалов включает в себя три основных операции:

1) подготовка поверхностей для склейки, которая заключалась в обработке их наждачной бумагой для создания шероховатости после очистки от антиадгезионных покрытий;

2) нанесение клеящего состава толщиной 0,1-0,2 мм на поверхности, подлежащие склеиванию.

3) отверждение образцов при температуре от 20° С до 25°С.

Важным технологическим фактором является давление склеивания, которое определяется, размером клеевых соединений, качеством их подгонки. Давление не только фиксирует положение склеиваемых поверхностей, но и способствует улучшению смачивания клеящим составом изделий и, следовательно, заполнению микронеровностей поверхностей. Кроме того, давление препятствует выделению летучих продуктов, образующихся в процессе отверждения клеящего состава, что исключает образование пористого непрочного клеевого шва.

При испытании и расчёте напряжений в образцах были получены следующие результаты (табл.4.4.).

Таблица 4.4. Результаты испытаний образцов на адгезионную прочность

№ п/п	% наполнения	L,мм	b,мм	t ₁ ,мм	t ₂ ,мм	F, мм ²	Pp, кг	τ _p , МПа
1	0	27	27	2	2	72,9	290	39,8
2	0	27	27	2	2	72,9	301	41,3
3	0,5	27	27	2	2	72,9	348	47,8
4	1	28	26	2	2	72,8	382	52,5
5	4	25	21	2	2	52,5	202	38,1

Испытания каждого вида клеевого соединения, в зависимости от степени наполнения матрицы наномодификатором, проводились на 4-5 образцах на разрывной машине модели Р-20 с максимальным усилием до 50 кН.

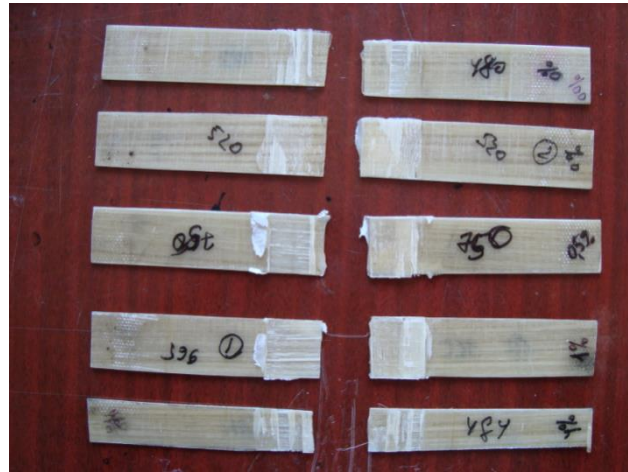


Рисунок 4.14. Образцы после испытания

По результатам испытаний (рис.4.14) получен график зависимости прочности сдвига (τ) от процентного наполнения (φ) матрицы наномодификатором

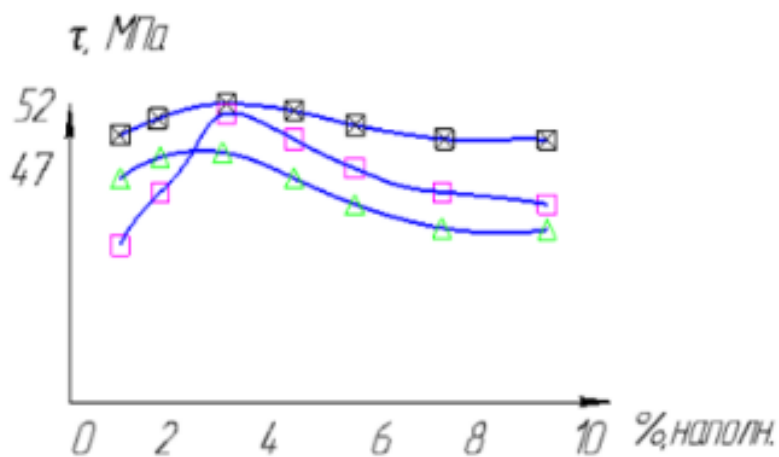


Рисунок 4.15. Зависимость прочности сдвига (τ) от процентного наполнения (φ) матрицы наномодификаторами

«□-аэросил» «Δ-Шунгит» и «■-УДАГ» (рис. 4.15).

Из графика видно, что адгезионная прочность связующего при добавлении 0,5% нанонаполнителя «аэросил» возрастает на 13,5

%, при добавлении 1 % нанонаполнителя возрастает на 21%. При дальнейшем добавлении нанонаполнителя до

4% прочность снижается до первоначального уровня.

4.3.2. Экспериментальное исследование образцов полимерного композита на герметичность

Одна из задач в изделиях аэрокосмического назначения – снизить водопоглощение материала конструкции. Это возможно нанесением тонких

пленок определенного состава.

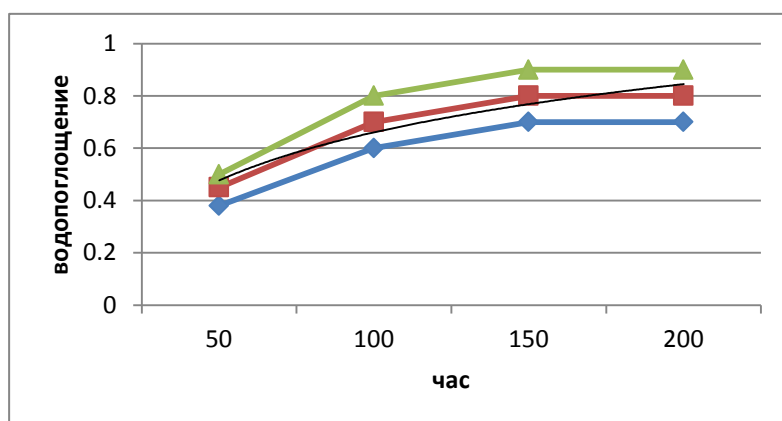
Известно, что поверхностное состояние полимера зависит от многих причин. В частности, от того какие активные группы ПКМ останутся свободными. Оценить поведение составляющих элементов ПКМ можно не только методами спектрального анализа (по изменению полос валентных колебаний ИК спектров), но и более простым методом изучения водопоглощения полимером, так как степень водопоглощения зависит от химической структуры материала.

При эксплуатации такие изделия из стекло- и углепластика подвергаются воздействию влажных сред, поэтому необходимо знать диффузионные характеристики, а также влияние воды на свойства материала.

Диффузионные характеристики определяют гравиметрическим методом [102]. Испытываемые образцы толщиной 2-3 мм предварительно высушивают до постоянной массы в эксикаторе с силикогелем и помещают в среду с 80-90% относительной влажностью, периодически взвешивая и по форме определяют водопоглощение в %:

$$Q = \frac{W - W_0}{W_0} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

где,



Δ – шунгит, ■ – УДАГ, ◻ – аэросил

Рисунок 4.16. Зависимость

водопоглощения от времени выдержки

длительное время (до 10 суток) во влажной атмосфере и даже в воде при комнатной температуре.

Q-водопоглощение;
 W_0 -вес образца до адсорбции;
 W_n -вес образца после адсорбции;
 n- количество часов выдержки образца в атмосфере 80% влажности или воде.

На рис. 4.16 показаны результаты выдержки образцов

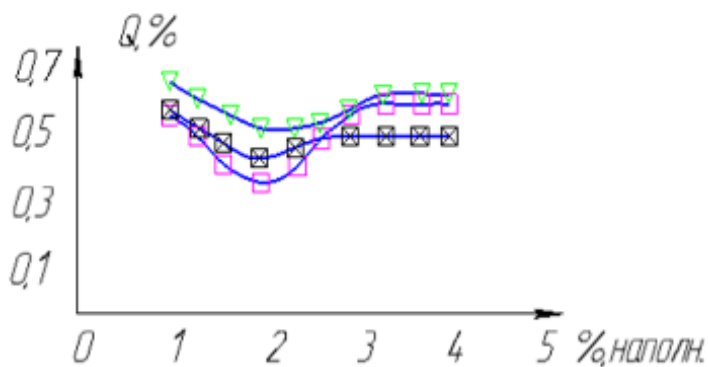


Рисунок 4.17. Водопоглощение тонких слоёв

Δ – шунгит, \blacksquare – УДАГ, \square – аэросил

Влагопоглощение достигает насыщения при 0,8 %.

При проведении эксперимента на начальном этапе происходит сорбция воды с поверхностью полимера. Для образцов и без модификатора, и с различными модификаторами она составляет 0,6% (рис.4.17).

Введение наномодификатора любого типа показывает снижение водопоглощения до 30% при соотношении «матрица – наномодификатор» 100: (1-4). Это обусловлено большим количеством микропор на границе раздела «матрица – модификатор», по мере проникновения молекул воды в материал происходит их взаимодействие с полярными группами полимеров.

Известно, что в ПКМ имеются области непроницаемые для процесса переноса молекул (наномодификатор и кластеры), поэтому уменьшить водопоглощение в объёме ПКМ можно изменением структуры полимерной матрицы. Водопоглощение пропорционально коэффициенту диффузии, следовательно, описанную модель взаимодействия полимерных тонких плёнок с наномодификатором можно считать важным подтверждением возможности получения тонкоплёночных покрытий с пониженным водопоглощением.

4.3.3. Экспериментальное исследование образцов полимерного композита на теплопроводность

Одной из основных теплофизических характеристик материалов является – теплопроводность, которую определяют количеством теплоты прошедшее через образец за фиксированный промежуток времени по уравнению теплопроводности:

$$\Delta Q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \cdot S \cdot \Delta t, \quad (4.5)$$

где ΔQ – теплота, прошедшая посредством теплопроводности через сечение площадью S за время Δt ; λ – коэффициент теплопроводности; $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры.

Для определения количества теплоты, прошедшей через образец необходимо определить изменение температуры теплоприемника. При этом:

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (4.6)$$

где ΔQ – количество теплоты, необходимое для нагрева теплоприемника; c – удельная теплоемкость материала теплоприемника; m – масса теплоприемника.

Приравняв правые части выражений (4.5) и (4.6) находим коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{S \cdot \Delta t \cdot \frac{dT}{dx}}. \quad (4.7)$$

Для определения коэффициента теплопроводности было изготовлено экспериментальное устройство, схема которого представлена на рис. 4.17. В состав макета устройства для измерения коэффициента теплопроводности входит следующее:

Образец 3 рис.4.17 представляет из себя сплюснутый цилиндр диаметром 4 мм и толщиной $1 \div 1,5$ мм с полированными торцевыми поверхностями. Для улучшения теплового контакта с нагревателем и теплоприемником их поверхности смазывались термопастой КПТ-19, которая имеет коэффициент теплопроводности $4 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$.

В качестве теплоприемника 2 рис.6.1 использовался медный цилиндр диаметром 4 мм и высотой 5 мм, с высверленным отверстием для хромель-алюмелевой термопары и массой 0,547 г, которая взвешивалась на аналитических весах с точностью 0,5 мг. Теплоемкость меди:

$$c = 0,3845 \text{ Дж/г} \cdot \text{К}$$

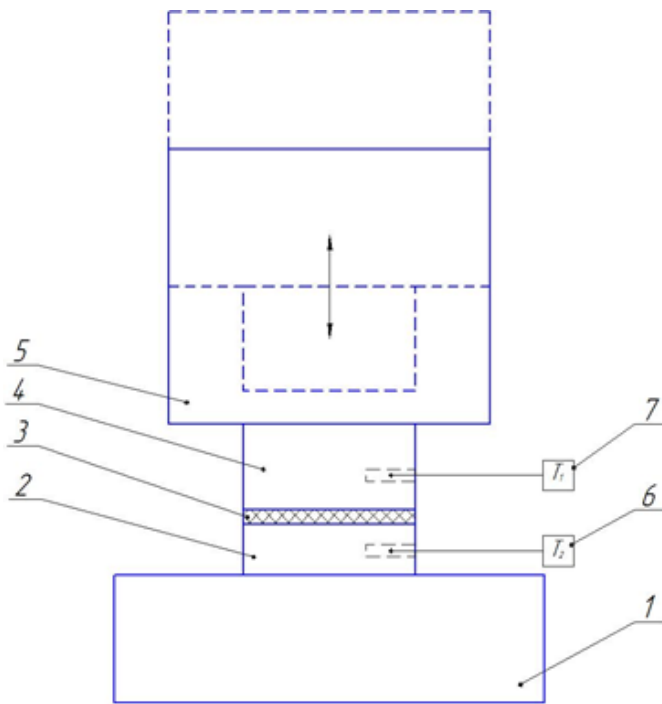


Рисунок 4.18 - Схема экспериментального устройства для определения коэффициента теплопроводности

1 – теплоизолирующая подложка; 2 – медный теплоприемник; 3 – исследуемый образец; 4 – тепло подводящий стержень; 5 – тепло нагреватель; 6, 7 – термопарные измерители температуры.

Теплопроводящий стержень (4) рис.4.18 представляет из себя медный стержень диаметром 4 мм, который вставлялся в 25 Ватт нагреватель (5) рис. 75, температура которого регулировалась измерением напряжения, подаваемого в нагреватель. В частности, при напряжении 80 В температура торца теплонагревающего стержня была 100° С. Температура торца стержня измерялась цифровым термопарным термометром (UNI-T M890G точность измерения 1 градус). Таким же образом измерялась температура теплоприемника.

Теплопроводящий стержень с нагревателем может плавно подниматься и опускаться по направляющим на образец.

Процесс измерения коэффициента теплопроводности осуществлялся следующим образом:

1. регулируя напряжения на нагревателе добиваемся нагрева торца теплопроводного стержня 100° С.
2. опускаем теплопроводящий стержень на поверхность образца, который с теплоприемником находится на теплоизолирующей подставке 1 рис. 4.17;
3. начинаем отчет изменения температуры за фиксированный промежуток времени (время измеряется цифровым секундомером)

4. полученные данные заносим в таблицу: T_1 – температура торца теплопроводящего стержня, T_2 – начальная температура теплоприемника, T_3 – конечная температура теплоприемника, Δt – время за которое осуществляется нагрев теплоприемника от температуры T_2 до T_3 .

Из полученных данных находим градиент температуры $\frac{dT}{dx}$:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_1 - \left(\frac{T_3 + T_2}{2}\right)}{h}, \quad (4.8)$$

где h – толщина исследуемого образца.

$$\Delta T = T_3 - T_2, \quad (4.9)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}. \quad (4.10)$$

Полученные данные подставляем в формулу (4.7) и вычисляем коэффициент теплопроводности λ .

Измерения повторялись 3-5 раз и находилось среднее значение.

Значения коэффициента теплопроводности λ , предоставленных образцов приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Значения коэффициента теплопроводности

№	Образец	Коэффициент теплопроводности $\lambda \times 10^{-2}$ Вт/м·К
1	10%	12,5
2	20%	20,2
3	30%	19,4
4	40%	24,7
5	50%	23,6

При необходимости увеличения точности изготовления определения коэффициента теплопроводности время и изменение температуры можно измерять при помощи электронного USB самопишущего потенциометра.

Таким образом, влияние наномодификаторов на теплофизические свойства ПКМ (табл. 4.6) показывает, что повышение степени наполнения от 10 до 70% привело к увеличению коэффициента теплопроводности:

-с наномодификатором ТРГ в два раза (с 0,2 до 0,61 Вт/мК);

-с наномодификатором «Таунит» в 1,6 раза (с 0,11 до 0,18 Вт/мК);

- с наномодификатором УДАГ в 2,2 раза (с 0,085 до 0,185 Вт/мК).

Таблица 4.6. Значения коэффициента теплопроводности для наноматериала

Термографит							
%	h, мм	d, мм	T _н , °С	T ₁ , °С	T ₂ , °С	t, сек	λ , Вт/м·К
10%	0,88	3,9	73	26	36	20,8	0,20
20%	1,28	3,7	73	26	36	17,6	0,34
30%	0,65	3,8	73	26	36	9,1	0,34
40%	1,12	3,9	70	25	35	19,6	0,30
50%	1,02	3,7	72	25	35	12,8	0,38
60%	0,92	3,7	71	25	35	12,6	0,37
70%	1,15	3,7	71	25	35	8,8	0,61
Графит ИДГ							
%	h, мм	d, мм	T _н , °С	T ₁ , °С	T ₂ , °С	t, сек	λ , Вт/м·К
5%	1,78	3,8	74	27	32	37	0,11
10%	1,82	3,8	72	27	32	37,5	0,12
20%	2,03	3,8	73	27	32	37,8	0,13
30%	1,45	3,8	73	27	32	19	0,18
Алмаз							
%	h, мм	d, мм	T _н , °С	T ₁ , °С	T ₂ , °С	t, сек	λ , Вт/м·К
5%	2,25	3,7	71	27	32	63,1	0,085
10%	1,84	3,8	72	27	32	41,8	0,104
20%	2,37	3,7	72	27	32	57	0,100
30%	1,68	3,7	74	27	31	21,5	0,185

4.4. Экспериментальное определение конструкционной прочности наномодифицированного полимерного композита в структуре малогабаритного корпуса

4.4.1 Конструкционная прочность микропластика на основе наномодификации матрицы

Образцы изготавливались без добавления наноматериала, и с добавлением в качестве наноматериала аэросила в соотношении 0,5,1,1,5 и 2%. Количество нитей в ленте согласно рекомендациям работы [12] было взято от 1 до 5 нитей, т.к. такое количество нитей давало максимальное разрывное усилие.

Технология изготовления образцов заключалась в следующем: смола ЭД-20 смешивалась с определенным количеством аэросила затем добавлялся отвердитель ПЭПА в количестве 10%. Полученным раствором пропитывалась нить или лента, состоящая из группы нитей (от 1 до 5 нитей).

Образцы из микропластика изготавливались методом намотки на плоскую рамку (рис.4.19). Армирующий материал (волокна) сматывался со шпули 1, пропускаясь через пропиточно-отжимной узел 2 и при помощи раскладчика 3, закрепленного на каретке 4, укладывался на вращающуюся рамку 5. Намотанные образцы отверждались в полимеризационной печи или по режиму отверждения, зависящего от выбранного типа связующего [7].

После полимеризации намотанная рамка разрезается на отдельные образцы, которые наклеиваются на ватман (рис.4.20), длина зоны зажима l_3 выбирается равной 30 мм. Длина рабочей зоны l_p выбирается в зависимости от цели исследований.

При определении R_{II}^+ и E_{II}^+ рекомендуется выбирать $l_p=100-150$ мм [91]. Для обеспечения качественного закрепления микропластика в зонах зажима после нанесения клея на основу и накладки подготовленный блок образцов ложился под пресс.

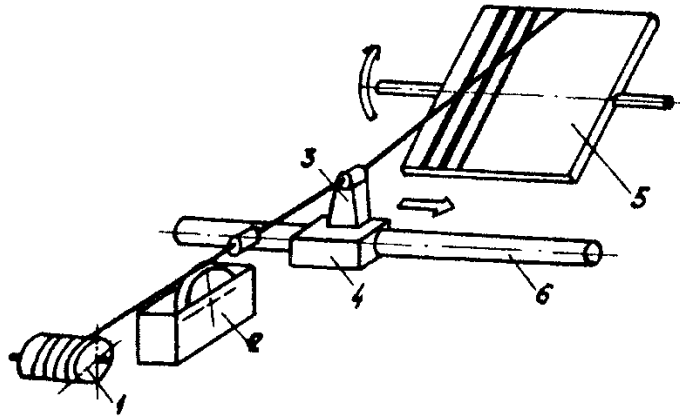
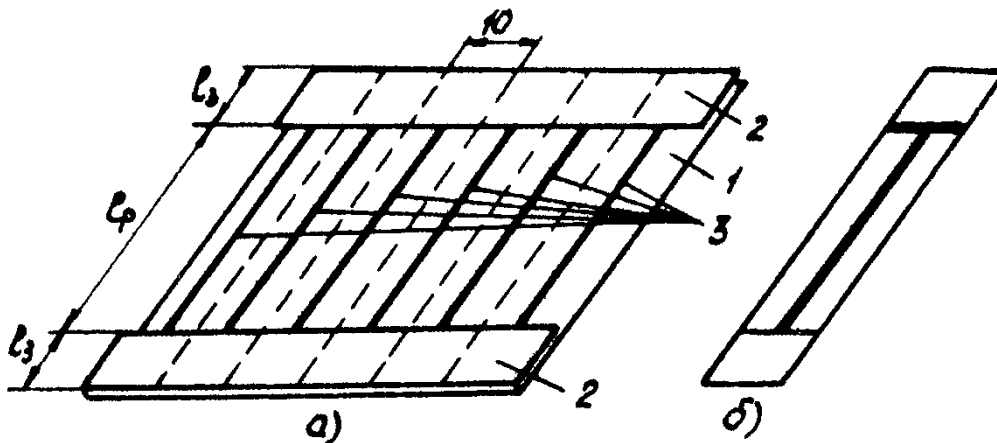


Рисунок 4.19. Схема изготовления образцов

1 – шпуля с исходным армирующим материалом; 2 – пропиточно-формирующий узел; 3 – раскладчик; 4 – каретка; 5 – плоская рамка; 6 – винт



а – блок образцов;

б – один образец;

Рисунок 4.20. Подготовка блоков образцов к испытанию

1 – основа (ватман); 2 – накладки (ватман); 4 – микропластик

После закрепления образца в зажимах испытательной машины бумажная основа 1 разрезается в рабочей зоне.

Так как разрывная нагрузка образцов из микропластика не превышает 500Н, то испытания проводили на разрывной машине типа 2038P-0,05. Нагружение образца производился с постоянной скоростью перемещения активного захвата, равной 20 мм/мин. Измерение нагрузки производилось с погрешностью не более 1% от измеряемой величины.

При испытании образцов различной длины для получения сравнимых результатов обеспечивалась одинаковая скорость нарастания деформаций в образце, которая достигалась изменением скорости перемещения активного захвата.

Для измерения деформаций использовались силоизмерительные датчики с управлением и регистрацией сигнала на пульте управления машины.

Эксперимент был поставлен на образцах без нанонаполнителя и с нанонаполнителем аэросилом (рис.4.21).

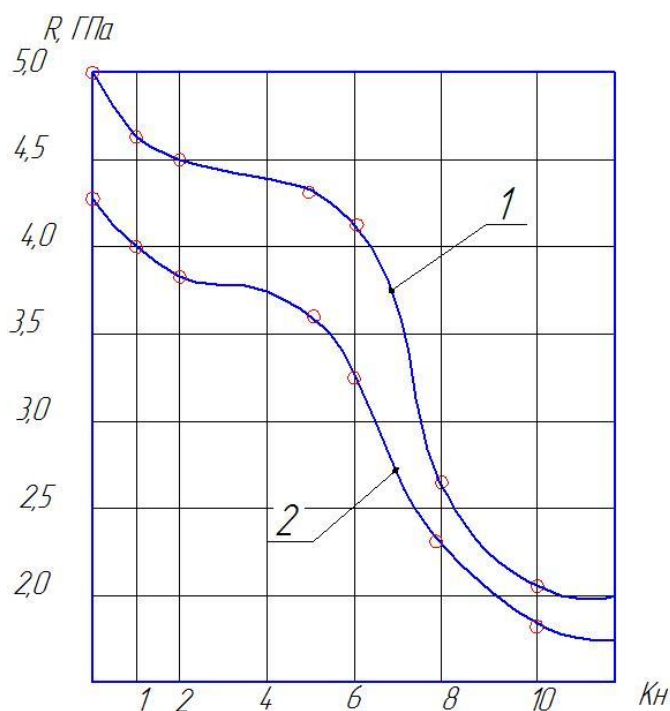


Рисунок 4.21. Зависимость прочности микропластика от количества нитей в ленте: 1- с нанонаполнителем - 1%, 2- без наполнителя

прочности микропластика с 3,5 ГПа до 2,3 ГПа, соответственно с нанонаполнителем $R_2=4,5-4,1$ ГПа

На третьем участке 6-10 нитей прочность микропластика продолжает снижаться. $R_3=1,9-2,5$ ГПа и соответственно $R_3=4,1-1,9$ ГПа

Таким образом добавление наномодификатора 1% в микропластик дало повышение прочности на 20%.

Рассмотрим экспериментальные зависимости, полученные на рис. 4.20. Из рисунка видно, что зависимость прочности микропластика от количества нитей можно разбить на три участка.

Первый участок - это 1,2 нити в ленте прочность микропластика практически имеет максимальное значение и меняется в пределах 10...20%. В среднем прочность первого участка составляет $R_1=3,5-4,1$ ГПа, а с наномодификатором 1% $R_1=4,5-4,9$ ГПа

На втором участке 3-5 нитей в ленте наблюдается резкое падение

прочности микропластика с 3,5 ГПа до 2,3 ГПа, соответственно с

4.4.2 Конструкционная прочность армирующего материала в цилиндрической части малогабаритного корпуса

Полученные результаты по микропластику используем для изготовления элемента корпуса транспортно-пускового контейнера типа «труба». Для этого изготавливаем образцы корпуса на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с различным процентным содержанием наномодификатора от 0,5-2% и отвердителем ПЭПА 10% по следующей технологии.

Наномодификатор в соотношении 0,5-2% размешивали с эпоксидной смолой ЭД-20 методом вращения при температуре 22°C в течении 30 мин, после этого в полученный состав добавляли отвердитель ПЭПА в количестве 10%.

Намотку образцов трубы проводили основе стеклонити ЕС6 34x3 Z80 П-10 ГОСТ 8325-93 на станке с ЧПУ по следующей схеме (90°;0°;90°).

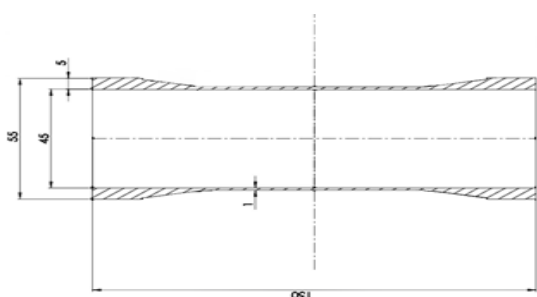


Рисунок 4.22.

Геометрические размеры образца трубы для испытаний

Изготовленные образцы трубы (табл. 4.7) разрезали на рекомендуемую длину рабочей зоны, усиливали торцы для предотвращения потери устойчивости [41].

Различные стандарты [25] предусматривают для испытаний на сжатие использование трубчатых образцов малых размеров. Для трубчатых образцов (рис. 4.22) необходимым условием является выдерживание соотношения:

Таблица 4.7. Характеристики испытываемых образцов

Содержание аэросила, %	D ₁ , мм	D ₂ , мм		S, мм ²	
		образец 1	образец 2	образец 1	образец 2
0	45	47	47	3,14	3,14
0,5		47,5	-	4,91	-
1		47	48	3,14	7,07
2		47	47,2	3,14	3,80

$$H = 2D, \quad (4.11)$$

где H – высота трубчатого образца, мм;

D – внешний диаметр, мм.

Прочность при сжатии определялась по формуле:

$$\sigma = \frac{p}{2b\delta}, \quad (4.12)$$

где p – разрушающая нагрузка, кгс;

b – ширина образца, мм;

δ – толщина образца, мм.

Для предотвращения потери устойчивости при проведении испытаний были изготовлены металлические опоры, на которые одевался трубчатый элемент с усиленными до толщины 5 мм торцами.

Испытания образцов на сжатие проводились на разрывной машине РН-50 с постоянной скоростью нагружения 2 мм/мин (рис.4.23) и характерным разрушением образцов при испытаниях показан на рис. 4.24.

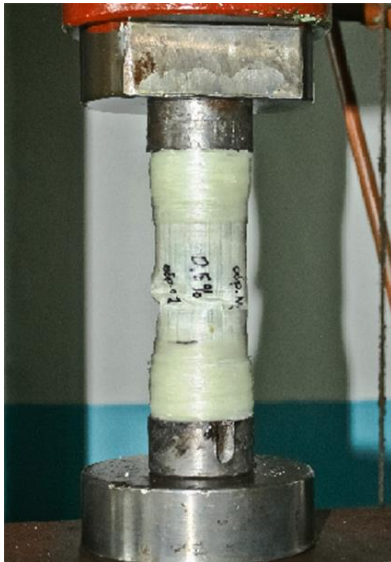


Рисунок 4.23. Образец трубчатого элемента в приспособлении для испытаний

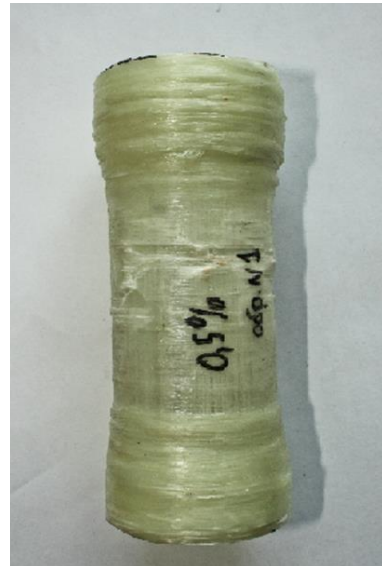


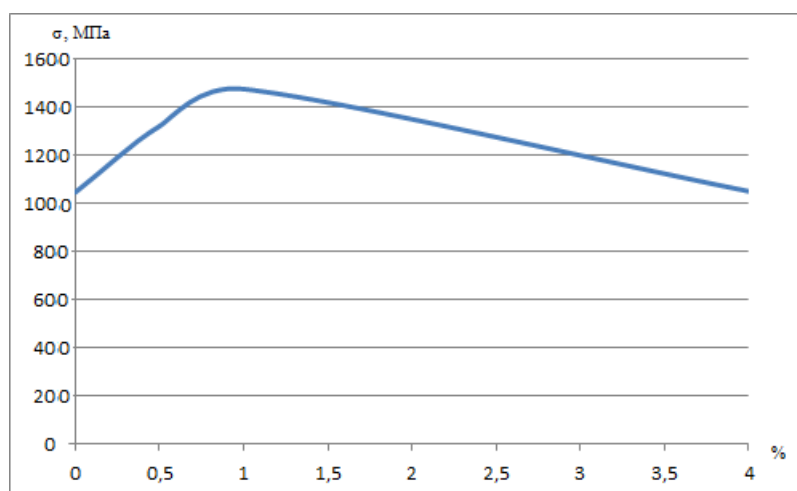
Рисунок 4.24. Характер разрушения трубчатого элемента с 0,5% нанонаполнителем

Результаты испытаний образцов без нанонаполнителя и с нанонаполнителем полимерной матрицы аэросилим А-300 представлены в таблице 4.8.

Таблица.4.8. Результаты эксперимента

№	Испытываемый материал	% наполнителя	P нагр, кгс	[σ] сж., МПа
1	Трубка цилиндрическая, нить Е, (жгут-5 нитей марки Е)	0	2240,0	1046,7
2	Трубка цилиндрическая, нить Е, (жгут-5 нитей марки Е)	0,5	2830,0	1322,4
3	Трубка цилиндрическая, нить Е, (жгут-5 нитей марки Е)	1	3160,0	1476,6
4	Трубка цилиндрическая, нить Е, (жгут-5 нитей марки Е)	4	2250,0	1051,4

На рис. 4.25 построена зависимость прочности образцов от содержания нанонаполнителя.



Добавление в качестве нанонаполнителя, аэросила, в количестве 1% дало повышение прочности при сжатии элемента трубы на 11%.

Рисунок 4.25. График зависимости прочности от процентного содержания аэросила

4.5. Выводы

1. При исследовании и идентификации наномодификаторов эпоксидной матрицы подтверждена их дисперсность и составлен классификатор использования наномодификаторов. Показано, что введение этих добавок в

связующее в количестве 1-4 % от их массы оказывает существенное влияние на свойства полимерной матрицы.

2. На основе механизма взаимодействия наномодификаторов различной природы с полимерной матрицей исследован технологический процесс повышающий качество намотки малогабаритных корпусов.

3. По результатам исследований намотанных образцов экспериментально установлено, что добавление в матрицу наномодификатора приводит к:

- увеличению в 1,5 раза адгезионной прочности полимерного композита при введении в него 1-2% наномодифицированного материала;

- повышению герметичности композитного слоя на 30% при введении до 2% наномодификатора любого типа;

- повышению конструкционной прочности на 20 % однониточного стеклопластика на растяжение при добавлении 1-2% наномодификатора аэросила;

- повышению коэффициента теплопроводности при степени наполнения наномодификаторами от 10 до 70%.

4. Конструкционная прочность армирующего материала в цилиндрической части малогабаритного корпуса на основе добавления наномодификатора в полимерную матрицу повысилась в 1,5 раза, что позволило повысить массовое совершенство и общий ресурс в 2 раза.

РАЗДЕЛ 5. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НАМОТКИ РЕАЛЬНЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ

5.1. Формы и характер внедрения результатов исследования

В основу диссертации положены материалы, которые представляют исследования, выполненные в пределах реализации госбюджетных тем Министерства образования и науки Украины ГН-30-06 «Разработка научных основ получения нанокomпозиционных материалов на основе полимерных матриц» (№ госрегистрации 0106U000290) 2006-2008 г.г., ГН-24-09 «Разработка нанотехнологий получения тонкоплёночных покрытий синтезом слоистых систем» (№ госрегистрации 0109U000067) 2009-2010 г.г., ГН-62-12 «Разработка эффективных преобразователей энергии на основе наноструктурированных материалов (№ госрегистрации 0112U000162) 2012-2013 г.г., хоздоговорных тем У-01-05 «Разработка технологии намотки, изготовление и поставка изделий «Труба 7X7.393.002» (№ госрегистрации 0306U003829), М-21-07 «Разработка технологий изготовления корпуса с теплоизоляцией изделия «Калибри» выполненные в соответствии с приоритетным направлением «Современные технологии и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе», секция 13 «Авиационно-космическая техника и транспорт».

Как уже отмечалось в разделе 1, особое место занимает актуальная триединая проблема технологического процесса повышения качества производства малогабаритных корпусов, решению которой была посвящена настоящая диссертация (рис. 5.1).

На рис. 5.1. представлена принципиальная схема исследований и внедрения результатов диссертации.

Полученные результаты можно условно разделить на шесть основных направлений использования:

- в учебном процессе Луганского национального университета им. Владимира Даля при подготовке современных высококвалифицированных кадров для машиностроения, в методических пособиях лекций, магистерских работах и дипломных проектов [60, 61, 62] (акт об использовании результатов, Приложение 4);

- в процессе совершенствования научно-производственной базы, разработке баллонов давления, технологических инструкций и другой документации, связанной с технологическими способами повышения уровня и стабильности функциональных характеристик баллонов давления на ПАО «Горизонт» [97] (акт об использовании результатов диссертации, Приложение 4);

- использование на производстве изделий из ПКМ для РКТ ГП «КБ «Луч» при реализации эффективного процесса теплопередачи слоев композита при вводе наномодификаторов [96], повышения качества внутреннего слоя из ПКМ с помощью комплексных добавок УДГ [119];

- в совместных работах с ЧП «АЭРО» по использованию наномодифицированного полимерного композита с повышенными ФМХ и прочностными свойствами для носовых обтекателей [122];

- поставка газовых пробоотборников с высокими ФМХ и прочностными свойствами на предприятия нефтегазодобывающей промышленности Российской Федерации (Приложение 4);

- конверсионное производство и поставка на предприятия труб пластиковых для строительной и нефтедобывающей отрасли [56,57].

Ниже приведено краткое описание видов некоторых показанных на схеме рис. 5.1. форм внедрения результатов диссертации.



Рисунок 5.1. Схема форм внедрения результатов работы

5.2. Технологический процесс изготовления малогабаритного корпуса РДТТ ракеты с металлическими фланцами

В конструкциях переносных ракетно-зенитных комплексах в настоящее время применяются обечайки корпусов ракет, выполненных из алюминиевого сплава. Изготовление данной конструкции технологически трудоёмко, поэтому была проведена замена алюминиевого корпуса на металлопластиковый, с использованием в технологическом процессе армирующего материала на основе наномодификации полимерной матрицы.

При этом механические свойства композиционного материала в изделии обуславливаются схемой расположения волокна и могут сознательно меняться изготовителем изделия, то есть конструкции могут изготавливаться с регулируемой анизотропией материала. Таким образом, при разработке конструкции из волокнистых композиционных материалов, получаемых методом намотки, проектирование требует одновременного охвата вопросов не только назначения геометрических размеров конструкции, но и назначения внутренней структуры материала - числа и порядка чередования слоев, углов ориентации, вида армирующих нитей и их относительного содержания в объеме композиции. Это требует обеспечения соответствия формы конструкции возможностям композиционных материалов и технологическим возможностям реализации конструкции методом непрерывной намотки [53].

Для определения рациональной формы шипа, отвечающей необходимой прочности, было выбрано два варианта: скругление шипа и изменение его длины (рис.5.2).

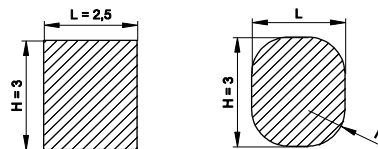


Рисунок 5.2. Начальная и измененная форма шипа

Результаты расчета в среде ANSYS представлены на графике зависимости напряжения от радиуса скругления шипа R (рис. 5.3).

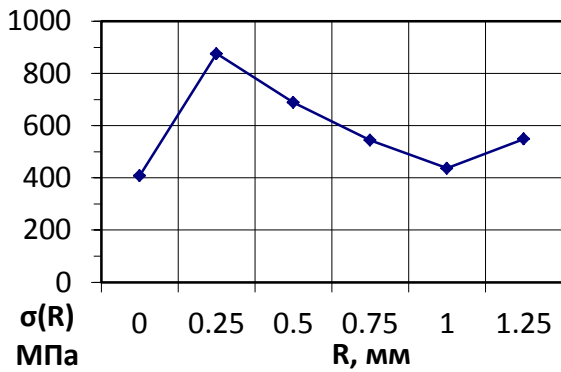


Рисунок 5.3. Зависимость напряжения от скругления шипа

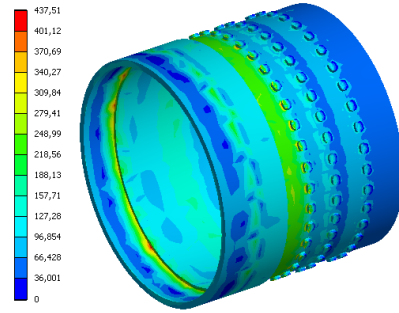


Рисунок 5.4. Напряжения при скруглении шипа, R = 1 мм

Результат нагружения фланца со скруглением шипа R равным 1 мм, показан в среде ANSYS (рис. 5.4). Расчет и результат нагружения показал, что оптимальный радиус скругления равен 1 мм.

Изменение длины шипа позволило получить результаты расчета, представленные графиком зависимости напряжения от длины шипа L (рис.5.5), а результат нагружения фланца с длиной шипа L равной 0,5 мм, показан на рис. 5.6.

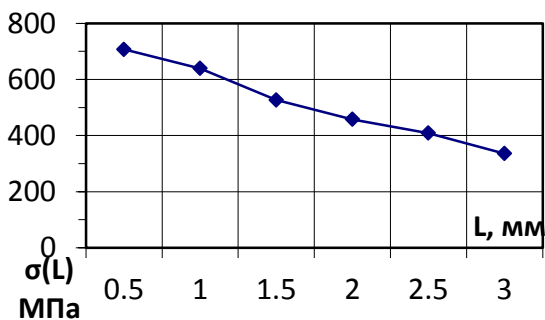


Рисунок 5.5. Зависимость напряжения от длины шипа

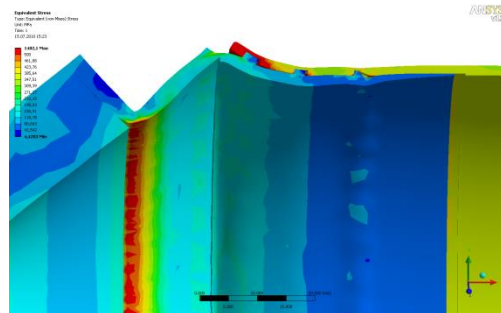


Рисунок 5.6. Напряжения при длине шипа, L = 0,5 мм

Расчет показал, что длина шипа L существенно влияет на прочностные характеристики соединения фланца с композитным слоем, однако значительное увеличение длины шипа увеличивает массу фланца и всей конструкции в целом, поэтому исходя из конструктивных соображений длина шипа равна 2,5 мм.

Для определения рационального положения шипа был выполнен расчет в среде ANSYS со смещением всех рядов шипов на величину K от крайнего положения в зацеплении с композитным слоем и изменением линейного порядка шипов на шахматный.

Результаты расчета в среде ANSYS представлены на графике зависимости напряжения от смещения K (рис.5 7).

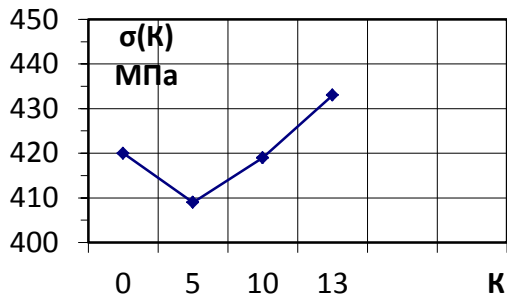


Рисунок 5.7. Зависимость напряжения от смещения рядов шипов

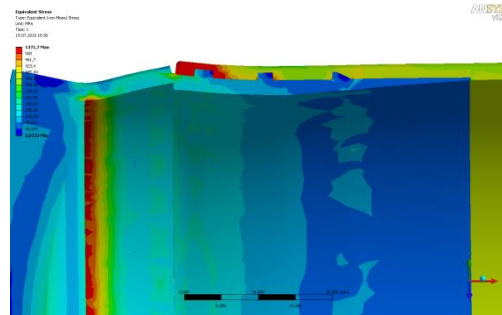


Рисунок 5.8. Напряжения при смещении рядов, $K = 13$ мм

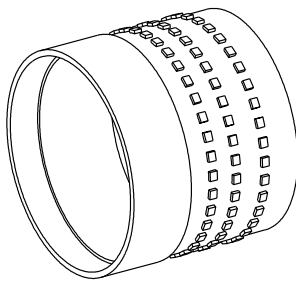


Рисунок 5.9. Модель фланца с шахматным расположением шипов

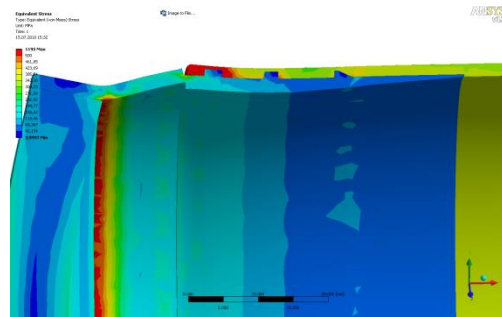


Рисунок 5.10. Напряжения при расположении шипов фланца в шахматном порядке

Результат нагружения фланца со смещением K равным 13 мм показан на рис.5.8. Расчет в среде ANSYS показал, что рациональное смещение рядов шипов составляет 5 мм, при этом максимальное напряжение составляет 409 МПа.

На рис.5.9 представлена модель соединения, где расположение шипов фланца находится в шахматном порядке, а результат расчёта напряжений в среде ANSYS показан на рис.5.10.

Расчет показал, что изменение порядка расположения шипов с линейного на шахматный, снижает максимальные напряжения до 385 МПа.

Проведенные испытания (рис.5.11 и 5.12) гидравлическим давлением подтвердили результаты расчетов.



Рисунок 5.11. Малогабаритный двигатель РДТТ после испытания



Рисунок 5.12. Вырыв шипов фланцевого соединения при испытании

5.3. Технологический процесс изготовления корпуса транспортно-пускового контейнера из стеклопластика

В качестве герметизирующего слоя был нанесен слой на основе наномодифицированного полимерного композитного материала, состоящего из матрицы; ЭДТ-10 и 0,5 % наполнения аэросилом А-300. Этап процесса намотки показан на рис. 5.13, а на рис.5.14 готовое изделие транспортно-пускового контейнера.

Намотка транспортно-пускового контейнера проводилась по следующей технологии:

- первый слой наносился на поверхность оправки составом ЭДТ-10 с 0,5 % аэросила;
- второй слой проводился кольцевой намоткой нитью ЕС-7-34x1x3(80) (ГОСТ 8325-93);
- третий и четвертый слои наматывался жгутом ЖС-2-1000;
- пятый слой выполнялся продольным - жгутом ЖС-2-1000;
- шестой слой наматывался жгутом ЖС-2-1000.



Рисунок 5.13. Процесс намотки транспортно-пускового контейнера



Рисунок 5.14. Корпус «Транспортно-пусковой контейнер» из стеклопластика

Намотка корпуса проводилась на переоборудованном намоточном станке с использованием удлинителя хода нитераскладчика.

Полимеризация корпуса выполнялась по стандартной технологической схеме с повышением температуры до 160⁰С.

Испытания корпусов (изготовленных с добавлением наномодификаторов в полимерную матрицу) показали повышение герметичности и несущей способности на 20-25%. При этом ресурс увеличился в два раза.

5.4. Внедрение результатов работы в производство

Базовым предприятием для внедрения технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных корпусов являлся ОАО Луганский завод горноспасательной техники «Горизонт».

Это предприятие специализируется на выпуске горноспасательной, противопожарной и медицинской аппаратуры, в которой основным конструктивным элементом являются металлокомпозитные баллоны высокого давления.

Ниже приведена номенклатура воздушно-дыхательных аппаратов, выпускаемой предприятием, на которые устанавливаются металлокомпозитные баллоны:

– аппарат дыхательный воздушный для спасательных служб химических предприятий АВХ (рис. 5.15, а). Представляет собой изолирующий дыхательный аппарат с двумя быстросъемными баллонами для сжатого воздуха и предназначен для индивидуальной защиты органов дыхания и зрения человека от воздействия непригодной для дыхания высокотоксичной и агрессивной газовой среды при ведении аварийно - спасательных работ.

- аппарат АСВ–2 (рис. 5.15, б) предназначен для защиты органов дыхания человека при работе в атмосфере непригодной для дыхания, а также при работе под водой на глубине до 20 метров, оснащенный двумя баллонами объёмом 4,5 л.

- аппарат воздушный изолирующий для пожарных АИР-317 (рис. 5.15, в) предназначен для индивидуальной защиты органов дыхания и зрения человека от вредного воздействия непригодной для дыхания.

Представляет собой изолирующий дыхательный аппарат с быстросъемным баллоном, объёмом 7 л.

- аппарат для дыхательной реанимации «Горноспасатель 11» (рис. 5.15, г) и его модификации;



а



б



в



г

Рисунок 5.15. Аппараты различного функционального назначения ОАО «Горизонт»:

а – аппарат для спасательных служб химических предприятий АВХ;

б – аппарат для работы в атмосфере непригодной для человека АСВ-2;

в – аппарат для пожарных АИР – 317;

г – аппарат для дыхательной реанимации «Горноспасатель – 11 р и 11 с»

«ГС-11с» применяется горноспасателями военизированной горноспасательной службы (ГВГСС) Минуглепрома.

«ГС-11р» применяется медицинскими работниками военизированной службы (ГВГСС), скорой и неотложной медицинской помощи.

предназначен для восстановления функций внешнего дыхания и газообмена, в составе комплектации которых входит однолитровый баллон.

Все изделия, выпускаемые заводом «Горизонт» сертифицированы по системе УкрСЕПРО и в системе международного Регистра судоходства РФ.

Завод «Горизонт» так же выпускает металлокомпозитные баллоны высокого давления для хранения и транспортировки сжатых газов: кислорода, воздуха, аргона, гелия, метана и сжиженных газов закиси азота, углекислоты, бутана пропана.

Баллоны имеют цилиндрическую форму с одним или двумя штуцерами с резьбой М16х1,5, изготавливаются двухслойными: герметичная оболочка из нержавеющей стали, оплетенная армирующим материалом на полимерной основе.

Потребный срок службы ряда баллонов не менее 10 лет или 5000 циклов заправки газом.

В таблице 5.1 приведены технические характеристики малогабаритных баллонов, выпускаемых ОАО «Горизонт» [149].

Внедрение технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных корпусов на заводе «Горизонт» заключалось в передаче технологических методик, алгоритмов и программного обеспечения с последующей их реализацией для конкретных изделий, изготовлении опытных партий изделий с полученными оптимальными параметрами и выборочных испытаний малогабаритных корпусов на статическую и циклическую прочность, регламентированную требованиями.

Таблица 5.1

Технические характеристики малогабаритных баллонов
ОАО «Горизонт»

Баллоны металлокомпо- зитные для газов	Количе- ство штуце- ров	Вмести- мость, л	Давлени- е, МПа	Геометрические размеры, мм		Масса, кг	$\frac{PV}{G}$ км
				Диаметр	Длина		
БМП-0,7-29	1	0,7	29,4	72	260	0,900	7,6
БМП-1-29	1	1,0	29,4	90	241	1,020	9,5
БМП-2-29	1	2,0	29,4	109	333	2,050	9,5
БМП-4-29	1	4,0	29,4	109	593	3,900	9,9
БМП-7-29	1	7,0	29,4	145	589	6,300	10,8
БМП2-0,7-29	2	0,7	29,4	72	276	1,000	6,8
БМП2-1-29	2	1,0	29,4	90	258	1,120	8,8
БМП2-2-29	2	2,0	29,4	109	345	2,150	9,0
БМП2-4-29	2	4,0	29,4	109	604	4,000	9,7
БМП2-7-29	2	7,0	29,4	145	601	6,400	10,6
СК-30	1	0,2	24,7	75	98	0,300	5,4
БК-0,7-20	1	0,7	20,6	73	260	1,000	4,8
БК-1-20	1	1,0	20,6	90	241	1,250	5,4
БК-2-20	1	2,0	20,6	110	333	2,000	6,8
БК-4-20	1	4,0	20,6	110	593	4,000	6,8
БК-7-20	1	7,0	20,6	145	589	7,000	6,8
БК2-0,7-20	2	0,7	20,6	73	276	1,100	4,3
БК2-1-20	2	1,0	20,6	90	258	1,350	5,0
БК2-2-20	2	2,0	20,6	110	345	2,100	6,5
БК-4-20	2	4,0	20,6	110	604	4,100	6,6
БК-7-20	2	7,0	20,6	145	601	7,100	6,7
БК-4,5-20	1	4,5	20,6	118	595	4,300	7,1
БК-0-4,5-20	1	4,5	20,6	115	595	3,200	9,6

5.5. Основные рекомендации работы

Выполненные в данной работе исследования позволили сформулировать следующие общие рекомендации:

Важным этапом в моделировании многослойных конструкций малогабаритных корпусов, изготавливаемых методом намотки из волокнистых композиционных материалов, является разработка технологической модели процесса армирования путем укладки композиционной ленты на поверхность оправки, на основе чего оценивается возможность реализации конкретной схемы армирования и получения требуемых свойств изделия. От точности разработки этой модели во многом зависит точность укладки АМ на поверхность оправки и расчет управляющей программы для намоточного оборудования с ЧПУ.

В процессе намотки изделие вращается, а нитераскладчик синхронно перемещается по определенному закону и обеспечивает заданную траекторию укладки АМ на поверхности изделия, поэтому между точкой укладки АМ на поверхность оправки и нитераскладчиком намоточного станка необходимо выдерживать гибкую связь.

При 3-х координатной намотке траектория движения нитераскладчика может иметь вид П-образной линии, эквидистантной относительно поверхности оправки изделия или обеспечивать постоянное расстояние от текущей точки укладки до нитераскладчика.

Наиболее простой способ намотки является вариант, при котором нитераскладчик движется по прямой, параллельной оси вращения изделия. Однако, при этом будут большие выбеги нитераскладчик вправо и влево от наматываемого изделия, что обуславливает необходимость использования намоточного станка с большим продольным ходом.

П-образная траектория движения представляет собой сочетание двух прямолинейных участков и также легко поддается математическому анализу. Кроме того, при этом максимально используются габариты намоточного станка.

Одним из самых эффективных является способ намотки, при котором нитераскладчик движется по равнокасательной траектории, обеспечивающей постоянное расстояние от точки схода АМ с нитераскладчика до точки укладки АМ на оправку. В этом случае могут наблюдаться незначительные выбеги нитераскладчика вправо и влево от наматываемого изделия. Но при равнокасательной траектории движения нитераскладчика отсутствует провисание технологической ленты АМ в процессе укладки на оправку, и создаются наилучшие условия для стабилизации скорости движения технологической ленты АМ. Это оказывает существенное влияние на стабильность нанесения и отжима связующего и, как следствие, на прочность получаемого изделия.

Намотку изделий можно производить на 2-х или 3-х координатном намоточном станке. Дополнительные координаты, используемые при намотке больших изделий диаметром более 500 мм, применяются для более качественной укладки КМ на поверхность оправки.

Порядок следования витков влияет на количество переплетений в структуре получаемого в процессе намотки композиционного материала, на прочность получаемого изделия. Как правило, оптимальный порядок следования витков (с точки зрения прочности, получаемого изделия) подбирается экспериментально путем многократных отработочных испытаний и определяется схемой нагружения и условиями работы конкретного изделия.

Алгоритм действий намоточного станка при переходе от одного витка к другому - называется программой перехода. Программа перехода состоит из двух программ: программы входа в виток и программы выхода из витка. При этом желательно чтобы программы переходы учитывали следующий ряд особенностей:

1 - необходимо, чтобы в процессе отработки программы перехода изделие устанавливалось в начальное положение, что облегчит запуск управляющей намоточной программы с середины процесса намотки в случае возникновения сбоя в системе управления.

2 - в случае если в процессе отработки программы перехода происходит фиксация АМ с помощью штырей, то необходимо стремиться, чтобы величина

одного кадра информации в ней была минимальна. Иначе может произойти срыв АМ со штыря.

Эта задача существенно усложняется еще и тем, что алгоритм программ перехода зависит от выбранного порядка следования витков. Поэтому следует разрабатывать такие алгоритмы программ перехода, при которых бы проводился анализ в каком месте находится в данный момент нитераскладчик и в какую точку необходимо произвести укладку АМ. Этот анализ позволит избежать большинства ошибок, возникающих в случае изменения порядка следования витков. Естественно, что алгоритм программ перехода в каждом конкретном случае будет свой и зависит от конструктивных особенностей изделия.

Также стабильность результатов достигается при изготовлении малогабаритных корпусов из композитного материала с определенными свойствами. Для регулирования и получения таких свойств полимерных композиционных материалов при технологическом процессе намотки в полимерное связующее вводят модификаторы различных типов. Один из перспективных способов модифицирования матрицы - добавление в нее дисперсных наполнителей.

Рекомендуемая технологическая схема состоит из следующих операций: 1. Подготовка материалов: волокна, матрицы и наномодификатора. 2. Расчет соотношения стекловолокно+матрица и математическое определение скорости намотки. 3. Подбор оптимального соотношения матрица+модификатор. Облучение модифицированной матрицы в среднем 10 мин. следующими способами: ультрафиолетовое облучение, инфракрасное облучение и магнитное облучение. В результате такой обработки олигомера образуются свободные радикалы, которые взаимодействуют с активными центрами дисперсных частиц, что обеспечивает увеличение степени сшивки матрицы во внешних поверхностных слоях и повышает прочность адгезии связующего к стекловолокну в 1,5 -1,8 раза.

Намотка производится в условиях, позволяющих удалить воздух, устранить «гофрирование» и регулировать скорость намотки.

Подготовка наномодификатора, например, природный материал шунгит необходимо подвергать механическому размолу до дисперсности 5 мкм, что дополнительно активировало его поверхность. Подготовка наномодифицированного связующего (соединение со смолой, пластификатором и отвердителем) и нанесение тонкого теплозащитного либо токопроводящего слоя на поверхность малогабаритного корпуса.

В качестве материала для оформления силового слоя выбран стеклопластик на основе волокна ЕС-6-34(18) х 3 и эпоксидной смолы ЭД-20. Общая толщина силового слоя малогабаритного корпуса равна 3 мм, угол армирования при намотке спиральных слоев составляет $25,8^\circ$ к оси баллона, кольцевых слоев - около 90° . При переходе на днища намотка спиральных слоев будет варьироваться от 10° до 50° к оси баллона. С учетом выполненного прочностного расчета основных элементов конструкции малогабаритного корпуса из полимерных и композитных материалов обоснована необходимость армирования композиционным материалом герметизирующей оболочки для обеспечения двукратного коэффициента запаса прочности баллона.

Технология изготовления полимерных малогабаритных корпусов (баллонов) позволяет исключить необходимость использования сварочного оборудования, больших производственных площадей (для хранения металлических листов, их раскроя, гибки и т.д.), отсутствует операция сборки днищ с обечайкой, как, например, в случае традиционного изготовления металлокомпозитных баллонов.

Таким образом, изготовление полимерно-композитных малогабаритных корпусов методом ротационного формования и намотки можно рекомендовать как перспективное направление производства баллонов давления нового поколения.

5.6. Выводы

1. Дан краткий анализ форм и характера внедрения результатов диссертации. Приведена принципиальная схема проведенных исследований и их внедрения в рамках проблемы, посвященной разработке методов повышения качества и эксплуатационных характеристик малогабаритных корпусов. В схеме нашли отражение основные шесть направлений: внедрение в учебный процесс подготовки высококвалифицированных кадров в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Луганской Народной Республики "Луганский национальный университет имени Владимира Даля"; использование в совершенствовании научно-производственной базы, оборудования для изготовления намоткой, а также в разработке технологической документации ОАО «Горизонт»; реализация в производстве изделий из ПКМ ГП «КБ «Луч», МЧП «АЭРО», «Донбасс-сервис».

2. Разработаны и внедрены технологические процессы изготовления корпуса РДТТ ракеты типа «Колибри» и транспортно-пускового контейнера позволяющие на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования и наномодификации полимерной матрицы при намотке, повышающее их массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс в 2 раза.

3. Разработанные в диссертации методы технологического обеспечения внедрены на заводе горноспасательной техники «Горизонт», выпускающую широкую номенклатуру дыхательных аппаратов для аварийно-спасательных работ при тушении пожаров, выполнении подводных работ, в медицине, для реабилитации космонавтов и другого конверсионного назначения. Проведённые на ОАО «Горизонт» экспериментальные исследования опытных серий баллонов, показали, что:

- массовое совершенство металлокомпозитных малогабаритных корпусов составляет 6,0...6,3 км., а металлоорганопластиковых – 10,0...10,5 км., т.е. по

отношению к баллонам из легированной стали, стеклопластиковые баллоны совершеннее по массе в 1,5 раза, а органопластиковые – в 2,4 раза;

- так как лейнер малогабаритного корпуса полностью намотан армирующим материалом с использованием технологии наномодификации, то появление трещин в его стенке не приводит к разрушению корпуса, повышая безопасность эксплуатации изделия;

- статический запас прочности для всех малогабаритных корпусов составляет не менее 2,9, что удовлетворяет требованиям «Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением»;

- коэффициент безопасности при ресурсной нагрузке внутренним давлением, на 10 % превышающим рабочее давление, составляет не менее двух.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача технологического обеспечения повышения качества производства малогабаритных композитных корпусов на основе совершенствования технологических режимов, оборудования, оснастки, а также использования полимерных композиционных материалов с изменением структуры армирования и наномодификации полимерной матрицы при намотке, повышающее их массовое совершенство, деформационные свойства и общий ресурс.

1. Анализ существующего уровня технологий и материалов для технологического обеспечения процесса намотки малогабаритных корпусов из полимерных композитов позволил выбрать технологические режимы, оборудование и оснастку, а также полимерные композиционные материалы и наметить пути повышения массового совершенства, деформационных свойств и общего ресурса.

2. Разработанное технологическое оснащение и технология формообразования намоткой малогабаритных корпусов сложной формы из полимерных композитов с использованием расчетных компьютерных систем, позволило: повысить их прочностные и жесткостные свойства, расширить диапазон изготавливаемых изделий и повысить производительность на 15-20 %.

3. Экспериментально определенные рациональные структурно-технологические параметры процесса намотки малогабаритных композитных корпусов позволило разработать программу автоматизированной намотки малогабаритных корпусов и повысить их массовое совершенство на 25%.

4. Разработанный технологический процесс намотки малогабаритных корпусов на основе наномодифицированной полимерной матрицы, позволил увеличить ресурс эксплуатации в два раза, а экспериментальные исследования подтвердили, что:

- адгезионная прочность полимерного композита при введении в него 1-2% наномодифицированного материала возросла в 1,5 раза;

- введение наномодификатора любого типа до 2% приводит к повышению показателя герметичности на 30%;

- прочность на растяжение однониточного микропластика на основе стекловолокна при 1-2% наномодификации аэросилом увеличилась на 15%, причем структурный параметр оказывает более существенное влияние (прочность МП снижается в 2 раза с увеличением числа нитей);

- прочность на сжатие трубчатого элемента увеличилась на 41% при введении 1% наномодификатора аэросил.

5. Анализ технико-экономической эффективности результатов внедрения технологического процесса повышения качества производства малогабаритных корпусов на основе наномодифицированного композитного материала, показал перспективность развития, возможность получения, ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов работы на 455 000 рублей РФ.

6. Разработанные в диссертации технологический процесс, методы проектирования, оснастка, оборудование и управляющие программы намотки малогабаритных композитных корпусов внедрены на производственных предприятиях ЛНР: заводе ОАО «Горизонт» и МЧП «Донбасс-сервис», а также в учебном процессе Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Луганской Народной Республики "Луганский национальный университет имени Владимира Даля".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алямовский, А.А. SolidWorks/CosmosWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов [Текст]/А.А.Алямовский – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с. ил.
2. Амбарцумян, С.А. Общая теория анизотропных оболочек [Текст] /С.А. Амбарцумян. - М.: Наука, 1967. - 984 с.
3. Анискевич, А.Н. Деформативность эпоксидного композита, наполненного наночастицами глины [Текст]/ А.Н. Анискевич, Т.И. Гласкова // Материалы 27-й Международной конференции и выставки «Композиционные материалы в промышленности». - Ялта, 2007. - С. 337-338.
4. А. с. №1756255 СССР, МКИ³ В65 Н54/28 Устройство для раскладки нитей [Текст]/ В.С. Ивановский, И.И. Яблонский, Г.В. Сыровой. - 1992.
5. Аюшев, Т.В. Геометрические вопросы адаптивной технологии изготовления конструкций намоткой из волокнистых композитных материалов [Текст]/ Т.В. Аюшев. - Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, - 2005. – 212 с.
6. Берлин, А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология [Текст]: Учебн. пособие. / А.А.Берлин; под ред. А.А.Берлина; изд. перераб. - СПб.: Профессия, 2009. - 560 с.
7. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композитных материалов [Текст]: Учеб. для вузов / И.М.Буланов, В.В. Воробей. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с., ил.
8. Бунаков, В.А. Динамическая устойчивость оболочек сетчатой структуры из композиционных материалов [Текст] / В.А. Бунаков, И.К. Лебедев // Научный вестник МГТУ ГА, серия «Эксплуатация ВТ и ремонт АТ». № 29. - М.: МГТУ ГА, 2000. 6 с.
9. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / В.В. Васильев. - М.: Машиностроение, 1988. - 272 с.
10. Васильев, В.В. Оптимальная форма оболочки вращения, изготовленной из стеклопластика методом непрерывной намотки [Текст]/ В.В.

Васильев, А.Н. Елпатьевский // Прочность и устойчивость тонкостенных авиационных конструкций. - М.: Машиностроение, 1971. – С. 220-227.

11. Васильев, В.В. Оптимальное проектирование слоистых композитов [Текст]/ В.В. Васильев, А.Р. Хазиев // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т.15, №1. – С. 3-16.

12. Возняк, Ю.В. Ефект пам'яті форми в наповнених епоксидних полімерах [Текст]: автореф. канд. ... дис. / Ю.В. Возняк. - К., 2007. - 18 с.

13. Вольмир, А.С. Устойчивость деформированных систем [Текст] /А.С. Вольмир. - М.: Наука, 1967. - 984 с.

14. Воробей, В.В. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей [Текст]/ В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука. 2003. - 164 с.

15. Воробей, В.В. Новые направления в современной технологии намотки конструкций из композитных материалов [Текст]/ В.В. Воробей, С.В. Евстратов. – М.: Машиностроение, Вестник МАИ, 2009. - т.16, №1. - С. 61-72.

16. Воробей, В.В. Технология непрерывной намотки нитью [Текст]/ В.В. Воробей, Н.Г. Мороз. - М.: Изд-во МАИ, 2007. – 180с.: ил.

17. Воробьев, Ю.С. Воздействие импульсных нагрузок на оболочечные элементы ГТД [Текст]/ Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, Л. Крушка // Авиационно-космическая техника и технология. - Х.: нац. аэрокосм., ун-т «ХАИ». - 2003. - Вин. № 40/5. - С. 64-67.

18. Воробьев, Ю.С. Проблемы анализа скоростного деформирования элементов конструкций при импульсном нагружении [Текст]/ Ю.С. Воробьев и др. // Авиационно-космическая техника и технология. - 2007. - № 11/47. - С. 35–43.

19. Воробьев, Ю.С. Об особенностях моделирования ударно-импульсного нагружения оболочек и пластин [Текст]/ Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко // Механіка та машинобудування. - 2006. - № 1. - С. 86-92.

20. Воробьев, Ю.С. Локальное импульсное воздействие на оболочечные элементы конструкций [Текст]/ Ю.С. Воробьев, М.В. Чернобрышко, Л. Крушка //

Авиационно-космическая техника и технология. – М., 2005. - № 9 (25). - С. 181-184.

21. Графит ГС-4. ГОСТ 8295-73 Графит смазочный. Технические условия. [Текст] - М.: Из-во стандартов, 1998. – 6 с.

22. Гагауз, Ф.М. Моделирование структурных параметров композита в соединительном элементе [Текст] / Ф.М. Гагауз, В.В. Гуменников // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2013. - Вып. 2 (74). – С. 46-53.

23. ГОСТ 17022-81. Графит. Типы, марки и общие технические требования. [Текст] - М.: Стандартиформ, 2010. – 8 с.

24. ГОСТ 14922-77. Аэросил. Технические условия. [Текст] - М.: Из-во стандартов, 1997. – 36 с.

25. ГОСТ 25.601-80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах [Текст]. – М.: Из-во стандартов, 1980. – 27 с.

26. Гуняев, Г.М. Разработка наномодифицированных углепластиков с повышенной вязкостью разрушения [Текст]/ Г.М. Гуняев и др. // Труды 4-й Московской международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». - М.: Знание, 2006. - С. 622-629.

27. Гуняев, Г.М. Структурная модификация полимерных и композиционных материалов углеродными наночастицами [Текст]/ Г.М. Гуняев, Е.Н. Каблов, С.И. Ильченко, А.Н. Пономарев и др. // Труды 4-й Московской международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». - М.: Знание, 2006. - С. 82-89.

28. Гуняев, Г.М. Использование природных шунгитов для упрочнения и придания проводящих свойств конструкционным углепластикам [Текст]/ Г.М.

Гуняев, Г.В. Начинина, И.А. Ковалевский // Труды 4-й Московской международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». - М.: Знание, 2006. - С. 102-106.

29. Дмитриев, С.О. Теплофизические свойства углеродных нанотрубок [Текст] / С.О.Дмитриев, А.О. Дмитриев // Сборник. Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2011. - С. 83-89.

30. Долматов, М.Ю. Полуэмпирическая теория адгезии высокомолекулярных соединений композиций [Текст]/ М.Ю. Долматов, М.Ю. Тимофеева // Материалы 26-й Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности». - Ялта, 2006. - С. 391-394.

31. Достижения в области композиционных материалов: Сб. научных трудов. [Текст] / Под ред. Дж. Пиатти Международный симпозиум. Испра, Италия, 1978. Пер. с англ. - М.: «Металлургия», 1982. 304 с.

32. Евстратов, С.В. Разработка технологических процессов изготовления сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов давления [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.07.05 / С. В. Евстратов; МАИ. – М., 2015. – 151 с.

33. Жданок, С.А. Синтез углеродных наноструктурных материалов и их применение [Текст]/ С.А. Жданок // Первый международный форум «Наноматериалы и нанотехнологии». - Минск, 2008. – С. 45-49.

34. Ивановский, В.С., Достижения научной школы ВНУ им. В. Даля в области проектирования и производства композитных баллонов высокого давления[Текст] / В.С. Ивановский, О.В. Ивановская // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. - Луганськ: СНУ, 2012.- Вип. 1/ 2012 (165) частина 2. – С. 107-111.

35. Ивановский, В.С. Технологические способы повышения прочности малогабаритных оболочек давления летательных аппаратов, на основе органоволокон [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / В. С. Ивановский; ХАИ. – Харьков., 1987. – 176 с.

36. Ивановский, В.С. Проектирование и технология изготовления оболочек внутреннего давления сложного профиля из композиционных материалов [Текст]/ В.С. Ивановский, И.И. Яблонский, Г.В. Сыровой // Тез. докл. Межвузовской научно-технической конференции «Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических средств». - Николаев: НКИ, 1989. – С. 22-24.

37. Ивановский, В.С. Технология производства композитного баллона с полимерным лайнером [Текст] / В.С. Ивановский, О.В. Ивановская // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2013. – Вып. 2 (74). – С. 40–45.

38. Ивановский, В.С. Корпус порошкового огнетушителя из композиционных материалов [Текст]/ В.С. Ивановский, И.И. Яблонский, Г.В. Сыровой, Е.Е. Бакст, Г.Е. Фрегер // Информационный листок о научно-техническом достижении № 89-014, МТЦНГИ. - Ворошиловград, 1989.

39. Ивановская, О.В. Методы проектирования металлокомпозитных баллонов высокого давления для систем летательных аппаратов и конверсионного назначения [Текст]: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. / О.В. Ивановская; Национальный аэрокосмический университет (ХАИ). – Харьков., 2002. - 160 с.

40. Игуменов, М.С. Разработка технологии изготовления гибридного сосуда высокого давления методом ротационного формования и линейного полиэтилена с применением армирования: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. [Текст] / М.С. Игуменов. Санкт-Петербургский государственный технологический институт. – Санкт-Петербург, 2015. - 145.

41. Калинин, В.А., Якунин В.И. Геометрическое моделирование технологического процесса намотки в производстве ЛА. [Текст]/В.А. Калинин, В.И. Якунин – М.: изд-во МАИ, 1995. – 68 с.

42. Карпов, Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов [Текст]: Учебник./Я.С. Карпов – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2010. – 768 с.

43. Карпов, Я.С. Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2006. – 359 с.
44. Кейсина, Т.В. Прочностные характеристики наноконпозиционных материалов [Текст] / Т.В. Кейсина, С.М. Шебанов, В.В. Никитин, В.Ю. Чунаев, И.В. Тихонов, В.Г. Бова // Материалы 28-й Международной конференции «композиционные материалы в промышленности». – Ялта. - 2008. - С. 124-125.
45. Колобов, Г.А. Технология, структура и свойства пирографита [Текст]/ Г.А. Колобов, Я.Н. Сидоренко // Материалы 23-й Международной конференции «композиционные материалы в промышленности». - Ялта, 2003. - С. 49-50.
46. Кудрявцев, Г.И. Армирующие химические волокна для композиционных материалов [Текст] / Г.И. Кудрявцев, В.Я. Варшавский, А.М. Щетинин, М.Е. Казаков. - М.: Химия, 1992. - 236 с.
47. Лебедев, И.К. Оптимизация варианта соединения авиационных конструкций из КМ и методика расчета его НДС [Текст]/ И.К. Лебедев //Научный вестник МГТУ ГА, серия «Эксплуатация ВТ и ремонт АТ. Безопасность полетов». - М.: МГТУ ГА, 2005. - № 85, 5 с.
48. Лебедев, И.К. Определение остаточного ресурса и эквивалентных режимов испытаний элементов авиаконструкций из КМ [Текст]/ И.К. Лебедев, В.В. Никонов // Международная научно-техническая конференция 17-18 апреля 2003 г., посвященная 80-летию гражданской авиации России. - М.: МГТУ ГА, 2003. – С.86-93.
49. Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам [Текст] / Дж. Любин.-пер. с англ. А.Б. Геллера и др.; под ред. Б.Э. Геллера. - М: Машиностроение, 1988. -584 с.
50. Ляшенко, В.И. Большая книга о малом наномире [Текст]/ В.И. Ляшенко, И.В. Жихарев, К.В. Павлов, Т.Ф. Бережная // Луганск: Альмаматер, 2008. - 580 с.
51. Малков, И.В. Анализ ветроэнергетики в Украине и дальнейшее ее развитие [Текст]/ И.В. Малков, Г.В. Сыровой, С.А. Кашкаров. - Луганск: Вісник

Східноукраїнського національного університету імені В. Даля, №2(173) 2012, С. 290-294.

52. Малков, И.В. Оптимизация спирально-кольцевой намотки малогабаритных цилиндрических корпусов элементов летательных аппаратов из композитных материалов [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / И. В. Малков; ХАИ. – Харьков., 1990. - 242 с.

53. Малков, И.В. Моделирование и оптимизация соединения металлического фланца с композитным корпусом РДДТ в специализированном приложении Ansys Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии [Текст] / И.В. Малков, Г.В. Сыровой, И.Л. Непран // Сборник научных трудов Национального аэрокосмического университета имени Н.Е. Жуковского, Харьков: ХАИ, 2010. - № 48, НАУ. - С. 80-86.

54. Малков, И.В. Применение наномодифицированных композитов в защите конструкций ветроэнергетических установок [Текст] / И.В. Малков, Л.П. Бондарь, Г.В. Сыровой, С.А. Кашкаров. -Краснодон: ВНУ им. В. Даля, 2011. – С.134-138.

55. Малков, И.В. Анализ влияния адгезии на свойства полимерных наномодифицированных композитов [Текст]/ И.В. Малков, Г.В. Сыровой, С.А. Кашкаров. - Луганск: Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля, №13 (184) Ч. 1 2012, С. 130-135.

56. Малков, И.В. Перспективы применения наномодифицированных полимеров в авиационной и космической технике [Текст] / И.В. Малков, Л.П. Бондарь, А.Г. Макухин, Г.В. Сыровой // Ресурсозберігаючи технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. Збірник наукових праць. - Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010. - С. 137-141.

57. Малков, И.В. Физико-химические основы наномодификации полимеров [Текст] / И.В. Малков, Л.П. Бондарь, Г.В. Сыровой // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. - Кременчук: КДПУ, 2008. - Вип. 5/ 2008 (52) частини 1. – С. 70-71.

58. Малков, И.В. Оптимизация технологии намотки малогабаритных цилиндрических корпусов элементов летательных аппаратов из композиционных материалов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / И.В. Малков ; Харьков, 1990. - 242 с. (ДСП)

59. Малков, И.В. Сравнительный анализ моделирования и расчета механических свойств изделий из композиционных материалов в среде SolidWorks [Текст] / И.В. Малков, Г.В. Сыровой, И.Л. Непран, С.А. Кашкаров / Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. - Краснодар: ВНУ ім. В. Даля, 2013. – С.123-127.

60. Малков, И.В. Механизм взаимодействия углеродных наномодификаторов с эпоксидной матрицей [Текст] / Л.П. Бондарь, Ю.И. Тарасов, Т.И. Воскобойников, Г.В. Сыровой //Труды 4-й Московской международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». - М.: Знание, 2006. - С. 662-665.

61. Малков, И.В. Механизм получения защитных слоёв эпоксидных конструкционных материалов путем их наномодификации [Текст] / И.В. Малков, Л.П. Бондарь, Г.В. Сыровой // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. - Луганськ: СНУ, 2010. - Вип. 10/ 2010 (152) Ч. 2. – С. 123-126.

62. Малков, И.В. Влияние наномодификации на прочность клеевого соединения полимерных композитных материалов [Текст] / И.В. Малков, Л.П. Бондарь, А.Г. Макухин, Г.В. Сыровой // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. - Луганськ: СНУ, 2011. - Вип. 1 / 2011 (155) Ч. 2. – С. 107-111.

63. Михальчук, В.М. Структурна модифікація оптично-прозорих густосітчастих епоксидних полімерів [Текст]: автореф. ... д-ра дис. / В.М. Михальчук. - К., 1999. - 43 с.

64. Маринин, В.И. Кинематический расчёт пятикоординатного намоточного станка с выходным укладываемым роликом нитетракта [Текст]

/В.И. Маринин, Д.Н. Князев, А.Г. Савин //Материалы двадцать шестой международной конференции и выставки 29 мая – 2 июня 2006 г., г. Ялта, Крым.

65. Маринин, В.И. Моделирование структуры изделия намотки [Текст]/В.И. Маринин, С.М. Журихин // «Композиционные материалы в промышленности» материалы двадцать шестой международной конференции и выставки 29 мая – 2 июня 2006 г., г. Ялта, Крым.

66. Маринин, В.И. Алгоритм построения опорной сети линий укладки нити на поверхности сложной формы [Текст] / В.И. Маринин, Д.Н. Князев, С.М. Журихин // «Композиционные материалы в промышленности» материалы двадцать шестой международной конференции и выставки 29 мая – 2 июня 2006 г. - Ялта, 2006. – С.213-225.

67. Маринин, В. И. Расчет сети намотки для сложной поверхности [Текст]/ В.И. Маринин, Д.Н. Князев, С.М. Журихин // Труды IV Московской международной конференции «Теория и практика технологии производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». - Москва, 2005. – С.448-456.

68. Машиностроение. Энциклопедия [Текст]/ Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) / Технология производства изделий из композиционных материалов, пластмасс, стекла и керамики // Т. III-6/ В.С. Боголюбов и др.; Под общ. ред. В.С. Боголюбова. - М.: Машиностроение, 2006. -576 с.: ил.

69. Миткевич, А.Б. Равновесные стеклопластиковые баллоны давления минимальной массы при негеодезической намотке [Текст] / А.Б. Миткевич, В.Д. Протасов // Механика полимеров. - Рига: Зинатне., 1975, №6. - С. 983-987.

70. Могильный, Г.А. Совершенствование технологической подготовки производства элементов конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов, изготавливаемых методом намотки [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Г. А. Могильный. – Луганск., 1998. - 210 с.

71. Могильный, Г.А. Изготовление аэродинамических поверхностей методом намотки из композиционного материала [Текст]/Г.А. Могильный // Материалы международной конференции «Теория и практика технологии

производства изделий из композиционных материалов» 30 янв.-2 фев. 2001. - М. : МГУ. 2001. – С. 88-94.

72. Могильный, Г.А. Определение траектории укладки армирующего материала (АМ) при изготовлении несущих поверхностей (НП) летательных аппаратов (ЛА) методом непрерывной намотки композиционным материалом (КМ) [Текст] / Г.А. Могильный, И.Ю. Киреев // Вісник Східноукр. нац. ун-та №12(130). - С. 95-104.

73. Молочев, В.П. Разработка композиционных баллонов давления для космической техники [Текст]/ В.П. Молочев // Механика композиционных материалов и конструкций. - М, 2010. - том. 16, № 4. - С. 587-596.

74. Молочев, В.П. Проектирование и экспериментальная отработка композитных баллонов давления для космической техники [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02: защищена 14.03.2012 / Молочев Валерий Петрович. – М., 2012. - 146 с.

75. Небрятенко, М.Ю. Шунгит-наполнитель эластомерных композиций [Текст]/ М.Ю. Небрятенко, В.Ю. Ионов, Н.П. Пашенко // Материалы 26-й Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности». - Ялта, 2006. - С. 337-338.

76. Образцов, И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов [Текст] / И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков. - М.: Машиностроение, 1977. – 144 с.

77. Полиновский, В.П. Применение программных продуктов фирмы MSC. Software для расчета новых изделий из композиционных материалов в ГКИПЦ им. М. В. Хруничева [Электронный ресурс.] / В.П. Полиновский // Тр. рос. конф. пользователей систем MSC 2003 г. - М.: MSC.Software Corporation. – 5 с. - Режим доступа: http://www.mssoftware.ru/document/conf/Moscow_conf/conf_2003/khntn2.zip

78. Пономарев, А.Н. Астралены-углеродные наномодификаторы фуллероидного типа [Текст] / А.Н. Пономарев, В.А. Никитин, Б.А. Шахматов и др. // Труды 4-й Московской международной конференции «Теория и практика

технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». - М.: Знание, 2006. - С. 147-154.

79. Пономарев, Н.Н. Углеродсодержащие композитные наполнители - возможность реализации фотодинамической защиты [Текст]/ Н.Н. Пономарев и др. // Труды 4-й Московской международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». - М.: Знание, 2006. - С. 642-653.

80. Пономарев, А.Н. Астролены - углеродные наномодификаторы фуллероидного типа [Текст]/ А.Н. Пономарев, В.А. Никитин, Б.А. Шахматов и др. // Труды 4-й Международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». - М.: Знание, 2006. - С. 147-154.

81. Прочностная обработка металлокомпозитных баллонов высокого давления [Текст] / Я.Г. Осадчий, Е.Н. Крылов, Ю.И. Русинович, П.В. Кононов // Транспорт на альтернативном топливе. – М., 2008. - № 3. - 30 с.

82. Пузырь, А.П. Модифицированные наноалмазы детонационного синтеза: фракционирование, свойства, варианты применения [Текст] / А.П. Пузырь, В.С. Бондарь и др. // Труды 4-й Международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов» - М.: Знание, 2006. - С. 649-653.

83. Разработка основ создания цельномотанных сложнопрофильных элементов машин из композиционных материалов [Текст]: Отчет о НИР (Заключительный.) / Восточноукраинский государственный университет (ВУГУ); Тема ГН 53-92; № ГР 0193U002384. – Луганск., 1994. - 151 с.

84. Рафали-Ламарка, Э.Э. Некоторые методы планирования и математического анализа биологических экспериментов [Текст] / Э.Э. Рафали-Ламарка, В.Г. Николаев. – К.: Наукова думка, 1971. – 120 с.

85. Рач, В.А. Об оптимальных технологических параметрах изготовления малогабаритных корпусов из армированных пластиков [Текст] / В.А. Рач, А.Б. Миткевич, И.В. Малков // Конструкции и технология получения изделий из

неметаллических материалов: Тез. докл. XI Всесоюз. конф., окт. 1988. - Обнинск, 1988. - С. 70-71.(ДСП).

86. Рач, В.А. Создание корпусов малогабаритных РДТТ одноразового и кратковременного действия из армированных пластиков [Текст]: дис. д-ра техн. наук / В.А. Рач. - Харьков, 1992. - 444с.

87. Рач, В.А. Влияние характеристик лентоформирующих трактов намоточных станков на конструкционную прочность волокон в малогабаритных оболочках [Текст]/ В.А. Рач // Механика композиционных материалов. - 1991. - №1. - С. 143-148.

88. Рач, В.А. Особенность расчёта цилиндрических оболочек летательных аппаратов из композиционных материалов [Текст] / В.А. Рач, В.С. Ивановский // Вопросы проектирования и производства тонкостенных силовых конструкций. – Харьков.: ХАИ, 1984 – С. 60-64.

89. Рач, В.А. Особенности реализации прочности исходных волокон в различно ориентированных слоях намотанных конструкций из органопластика [Текст] / В.А. Рач, В.С. Ивановский, А.Б. Миткевич // Механика армированных пластиков. - Рига, 1985. - С. 43-48.

90. Рач, В.А. Об оптимальных технологических параметрах изготовления малогабаритных корпусов из армированных пластиков [Текст] / В.А. Рач, А.Б. Миткевич, И.В. Малков // Конструкции и технология получения изделий из неметаллических материалов: Тез. докл. XI Всесоюз. конф., окт. 1988. - Обнинск, 1988. - С. 70-71.

91. Рач, В. А. Оптимизация цилиндрических баллонов давления по критерию массового совершенства[Текст] /В.А. Рач // Механика композитных материалов. – Рига, 1990. — №3. - С .489-494.

92. Росато, Д.В. Намотка стеклонитью [Текст] /Д.В. Росато, К.С. Грове, - М.: Машиностроение, 1969. - 310 с.

93. Рогинский С.Л. Высокопрочные стеклопластики [Текст] /С.Л. Рогинский, М.З. Канович, М.А. Колтунов. – М.: Химия, 1979, - 144 с.

94. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов [Текст]. - М.: Изд-во физ-мат литературы, 1961. - 863 с.
95. Старокодомский, Д.Л. Концентрация и дисперсность аэросилов как фактор изменения химической стойкости и прочности эпоксиполимеров [Текст] / Д.Л. Старокодомский // Материалы 27-й Международной конференции и выставки «Композиционные материалы в промышленности». - Ялта, 2007. - С. 323-328.
96. Сыровой, Г.В. Моделирование намотки сложнопрофильных малогабаритных корпусов летательных аппаратов из полимерных композитных материалов [Текст] / Г.В. Сыровой // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2013. - Вып. 1 (73). – С. 33–39.
97. Сыровой, Г.В. Разработка и внедрение баллонов высокого давления из композитных материалов для различных отраслей промышленности [Текст] / Г.В. Сыровой, Е.И. Гончарова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. - Луганськ: СНУ, 2014. - Вип. 4/ 2014 (211) частина 2. – С. 73-77.
98. Тарнопольский, Ю.М. Методы статических испытаний армированных пластиков [Текст] / В.Ю. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис. - М.: Химия, 1981. - 272 с.
99. Технология производства летательных аппаратов из композиционных материалов: учеб. Пособие [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.Н. Кобрин, Г.А. Молодцов. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989. – 332 с.
100. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении [Текст] / Под ред. А.Г. Братухина, В.С. Боголюбова, О.С. Сироткина. - М.: Знание, 2003. - 516 с.
101. Ткачев, А.Г. Промышленная технология и оборудование синтеза углеродных нанотрубок [Текст] / А.Г. Ткачев, А.А. Пасько, Н.Р. Мелитов, А.А. Баранов, И.Н. Шубин, С.В. Блинов // Первый международный форум «Наноматериалы и нанотехнологии». - Минск, 2008. – С.216-224.

102. Токарев, В.С. Міжфазні реакції функціональних олігомерів, як метод створення наночарів і композитних матеріалів: автореф [Текст]: дис. ... д-ра дис. / В. С. Токарев. - Львів, 2006. - 46 с.

103. Трощенко, В.Т. Механика поведения материалов при различных видах нагружения [Текст] / В.Т. Трощенко и др. - К., 2000. - 566 с.

104. Тулинов, А.Б. Моделирование процесса получения ремонтных композиционных материалов с ультрадисперсными наполнителями Материалы конференции [Текст] / А.Б. Тулинов, А.Б. Гончаров // Композиционные материалы в промышленности. – Ялта, 2009. - С. 128-132.

105. Фрегер, Г.Е. Основы механики и технологии композиционных материалов [Текст]: Учебное пособие / Г.Е. Фрегер, М.Д. Аптекарь, Б.Б. Игнатъев, В.В. Чесноков, А.Х. Меликбеян, В.А.Коструб. - К.: Аристей, 2004. - 524 с.

106. Хазиев, А.Р. Оптимальное армирование слоистых композитов по условиям прочности [Текст] / А.Р. Хазиев // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. – М.: ФГУП «НТЦ «Информтехника». – 2008. – Вып. 3(150). – С. 18-24.

107. Хазиев, А.Р. Оптимальное проектирование композитных элементов конструкций по условиям прочности и жесткости и устойчивости [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / А.Р. Хазиев ; М., «МАТИ» - Российский государственный технологический университет, 2009. – 210 с.

108. Харченко, М.Е. Приближенные зависимости между пределами прочности полимерных композиционных материалов при сжатии, растяжении и изгибе [Текст] / М.Е. Харченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». - Х., 2013. - Вып. 2 (74). – С. 54–63.

109. Цопа, В.А. Основы технологии намотки силовых оболочек соплового блока РДТТ [Текст] / В.А. Цопа, С.Н. Смоляр // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Темат. сб. научных трудов ХАИ. - Харьков, 1998. С.83-97.

110. Цопа, В.А. Основы технологии изготовления силовых оболочек соплового блока РДТТ [Текст] / В.А. Цопа, В.Е. Гайдачук, В.Н. Льяной, С.Н. Смоляр // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Темат. сб. научных трудов ХАИ. - Харьков, 1998. С.113-122.

111. Цыплаков, О.Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов [Текст] / О.Г. Цыплаков. - Пермь: Пермское книж. изд-во, - 1975. - Ч 2. - 274 с.

112. Чеховой, А.Н. Самоорганизация ансамблей наночастиц в гетерафазных материалах [Текст] / А.Н. Чеховой // Труды 4-й Московской международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов». - М.: Знание, 2006. - С. 680-688.

113. Шукшунов, В.Е. Автоматизированные системы управления намоточными станками [Текст] / В.Е. Шукшунов, В.Г. Жуковский, А.И. Евченко, И.А. Калинин, Н.Ф. Твердохлебов, Г.А. Черноморов.- М.: Машиностроение, 1985. - 208 с.

114. Яковенко, П.А. Моделирование импульсного нагружения металлокомпозитных цилиндрических оболочек с частичным армированием Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии [Текст] / Яковенко П.А., Малков И.В., Корбач В.Г., Сыровой Г.В. // Сборник научных трудов Национального аэрокосмического университета имени Н.Е. Жуковского, - Харьков: ХАИ, 2013. - № 58, НАУ. - С. 73-81.

115. Bogdanovich, A. etal. Fabrication and Mechanical characterization of Carbon Nanotube Yarn, 3-D Braids and Their Composites / A. Bogdanovich. // SAMPLE Journal.Vol. 43№1. - 2007. - P. 6-17.

116. Kang, D.H., Kim, C.U., Kim, C.G. "The embedment of fiber Bragg grating sensors into filament wound pressure tanks considering multiplexing" NDT&E Int., 39 (2006). - P. 119-116.

117. Malkov, I. Properties of epoxy materials with different nano-modifiers / I. Malkov, L. Bondar, A. Makukhin, G. Syrovoy // ТЕКА.Commission of motorization

and power industry in agriculture Lublin university of technology. Lublin, 2010. - P. 28-32.

118. Malkov, Igor. The analysis of adhesion effect on properties of the modified polymeric nano composites / Igor Malkov, Gennadiy Sirovoy, Sergii Kashkarov, Igor Nepran. // TEKA, Commission of motorization and energetics in agriculture, Lublin, Poland-2012. Vol. 12 N. 4.-P. 131-134.

119. Malkov, I. Effect of nanomodification on durability of adhesive joint of polymeric composite materials / I. Malkov, L. Bondar, A. Makukhin, G. Syrovoy // TEKA. Commission of motorization and power industry in agriculture Lublin university of technology. - Lublin, 2010. - P. 185-189.

120. Malkov, Igor. The calculation method of small-sized composite enclosures in CAD/CAE systems / Igor Malkov, Gennadiy Sirovoy, Sergii Kashkarov, Igor Nepran. // TEKA Commission of motorization and energetics in agriculture, Lublin, Poland-2012. Vol. 12 N. 3.-P. 100-104.

121. Meyers, M.A. Dynamic's behavior of materials / M.A. Meyers. - New York: Wiley. - 1994. - 283 p.

122. Malkov, Igor. Stress-strain analysis of metal butt connection with composite propeller blade /Igor Malkov, Gennadiy Sirovoy, Igor Nepran //TEKA, Commission of motorization and energetics in agriculture, Lublin, Poland-2013. Vol. 13 N. 4.-P. 143-148.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Расчет толщин армирующего материала реального баллона БК-2-200

Силовая оболочка из композитного материала выполнена спирально-кольцевой намоткой армирующего материала. Угол армирования спирального слоя на цилиндрической части баллона определяется из геометрических размеров элементов баллона.

Угол армирования на цилиндрической части со стороны штуцера:

$$\varphi_{шт} = \arcsin \frac{d_1 + \delta_{ленты}}{D} = \arcsin \frac{3,2 + 0,7}{10,8} = 21,17^\circ,$$

где $D = 10,8 \text{ см}$ - диаметр цилиндрической части лейнера.

Угол армирования на цилиндрической части со стороны приставного центра:

$$\varphi_{ц} = \arcsin \frac{d_2 + \delta_{ленты}}{D} = \arcsin \frac{1,6 + 0,7}{10,8} = 12,30^\circ.$$

Средний (расчетный) угол армирования спирального слоя:

$$\varphi_{ср} = \frac{\varphi_{шт} + \varphi_{ц}}{2} = \frac{21,17 + 12,30}{2} = 16,74^\circ.$$

Толщина армирующего материала спирального слоя на цилиндрической части баллона считается по выражению:

$$h_{сн} = \frac{nPP}{4[\sigma_c^{ам}] \cos^2 \varphi_{ср}^{экс}} = \frac{3 \cdot 210 \cdot 10,8}{4 \cdot 13000 \cdot \cos^2 16,74} = 0,143 \text{ см},$$

где $[\sigma_c^{ам}] = 13000 \text{ кгс/см}^2$ - конструкционная прочность армирующего материала в пластике спирального слоя;

$n = 3$ - коэффициент запаса прочности;

$P = 210 \text{ кгс/см}^2$ - рабочее давление в баллоне.

Толщина армирующего материала кольцевого слоя считается по выражению:

$$h_{к} = \frac{nPP(2 - \text{tg}^2 \varphi_{ср})}{4[\sigma_k^{ам}]} = \frac{3 \cdot 210 \cdot 10,8 \cdot (2 - \text{tg}^2 16,74)}{4 \cdot 13000} = 0,25 \text{ см},$$

где $[\sigma_k^{ам}] = 13000 \text{ кгс/см}^2$ - конструкционная прочность армирующего материала в пластике кольцевого слоя.

При однозонной спирально-кольцевой намотке, трансверсальные напряжения, возникающие в спиральном слое, снижают несущую способность армирующего материала, приводящие к разрушению баллона в зоне переходе «днище – цилиндр». Поэтому с целью снижения этих напряжений укладка армирующего материала выполняется многозонной – три зоны с углами армирования $\varphi_1 = 16,74^\circ$, $\varphi_2 = 25^\circ$ и $\varphi_3 = 50^\circ$. При этом часть толщины спирального слоя с углом армирования $\varphi_1 = 16,74^\circ$ и часть толщины кольцевого слоя перераспределяется на спиральные слои с углами армирования $\varphi_2 = 25^\circ$ и $\varphi_3 = 50^\circ$ с соотношением толщин:

$$h_{cn\ 16} : h_{cn\ 25} : h_{cn\ 50} : h_k = 0,93 : 0,77 : 1,6 : 1,$$

то есть

$$h_{cn\ 16} = 0,103 \text{ см}, h_{cn\ 25} = 0,086 \text{ см}, h_{cn\ 50} = 0,177 \text{ см}, h_k = 0,111 \text{ см}.$$

1. Расчет намоточных данных

1.1. Спиральный слой

1.1.1. Спиральные слои 1-ой зоны укладки

Угол армирования на цилиндрической части принимаем $\varphi_1 = 16,74^\circ$.

Полный геометрический угол поворота оправки для спирального слоя 1-ой зоны укладки при угле армирования $\varphi_{cp}^1 = 16,74^\circ$:

$$\varphi_z^2 = 2(\psi_u^2 + 2\psi_o^2) = 2(142,1 + 2 \cdot 80) = 604,2^\circ,$$

где $\psi_o^1 = 80^\circ$ - угол поворота днища при укладке АМ;

$$\Phi_H = \frac{360L_u \operatorname{tg} \varphi_{cp}^1}{\pi D} = \frac{360 \cdot 445 \cdot \operatorname{tg} 16,74}{3,14 \cdot 108} = 142,1^\circ - \text{угол поворота оправки при укладке}$$

АМ по цилиндрической части лейнера.

Намоточный (теоретический) угол поворота оправки из условия укладки ленты по поверхности изделия для спирального слоя 1-ой зоны укладки при угле армирования $\varphi_{cp}^1 = 16,74^\circ$:

$$\Phi_H = 360n \pm \frac{360}{K} = 360 \cdot 2 - \frac{360}{3} = 600^\circ$$

где $n = 2$;

$K = 3$ - порядок симметрии текстурного слоя.

Погрешность угла поворота:

$$\Delta\Phi = |\Phi_r - \Phi_n| = |604,2 - 600| = 4,2^\circ,$$

т.к. $\Delta\Phi = 4,2^\circ$, принимаем значение полного геометрического угла поворота оправки $\Phi_H = 600^\circ$.

Намоточный угол спирального слоя 1-ой зоны укладки при угле армирования $\varphi_1 = 16,74^\circ$ [109] равен $\Phi_n = \Phi_r = 600^\circ$, то в пересчете на константу намоточного станка координата перемещения по "W":

$$U_{расч} = \frac{\Phi_n U_o}{360^\circ} = \frac{600 \cdot 50}{360} = 83,333 \text{ мм},$$

где $U_o = 50 \text{ мм}$ - константа станка (приращение по координате "W" за один оборот шпинделя станка).

Число лент спирального слоя:

$$k_{л} = \frac{h_c \pi \gamma D \cos \varphi_1 10^5}{T k_{нс}} = \frac{0,103 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 10,8 \cdot \cos 16,74 \cdot 10^5}{102 \cdot 36} = 228,$$

где $\gamma = 2,5 \text{ г/см}^3$ - массовая плотность АМ;

$T = 102 \text{ текс}$ - линейная плотность одной нити;

$k_{нс} = 36$ - количество нитей в ленте АМ спирального слоя.

Минимальное число лент в одном спиральном слое для застильной укладки должно быть:

$$N_{\min}^{12} = \frac{2\pi D \cos \varphi_1}{a} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10,8 \cdot \cos 16,74}{0,7} = 93,$$

где $a = 0,7 \text{ см}$ - ширина ленты АМ.

Определяем возможное число спиральных слоев:

$$\xi = \frac{k_{\lambda}}{N_{\min}} = \frac{228}{93} = 2,45, \text{ то есть } \xi = 2.$$

Число лент в одном спиральном слое:

$$N = \frac{k_{\lambda}}{\xi} = \frac{228}{2} = 114.$$

Для укладки необходимого числа лент АМ на поверхности изделия вычисляется дополнительный поворот оправки (смещение):

$$\Delta U = \frac{2U_o}{NK} = \frac{2 \cdot 50}{114 \cdot 2} = 0,142 \text{ мм},$$

где $K = 2$ - порядок симметрии текстурного слоя.

1.1.2. Спиральный слой 2-ой зоны укладки

Угол армирования на цилиндрической части принимаем $\varphi_2 = 25^\circ$.

Полный геометрический угол поворота оправки для спирального слоя 2-ой зоны укладки при угле армирования $\varphi_{cp}^2 = 25^\circ$:

$$\varphi_c^2 = 2(\Phi_u^2 + 2\Phi_o^2) = 2(220,3 + 2 \cdot 80) = 760,6^\circ,$$

где $\Phi_o^2 = 80^\circ$ - угол поворота днища при укладке АМ;

$$\Phi_u^2 = \frac{360L_u \operatorname{tg} \varphi_{cp}^2}{\pi D} = \frac{360 \cdot 445 \cdot \operatorname{tg} 25}{3,14 \cdot 108} = 220,3^\circ - \text{угол поворота оправки при укладке}$$

АМ по цилиндрической части лейнера.

Намоточный (теоретический) угол поворота оправки из условия укладки ленты по всей поверхности изделия для спирального слоя 2-ой зоны укладки при угле армирования $\varphi_{cp}^2 = 25^\circ$:

$$\Phi_n^2 = 360n \pm \frac{360}{K} = 360 \cdot 2 + \frac{360}{10} = 756^\circ$$

где $n = 2$;

$K = 10$ - порядок симметрии текстурного слоя.

Погрешность угла поворота:

$$\Delta \Phi = |\Phi_{\Gamma} - \Phi_n| = |760,6 - 756| = 4,6^\circ,$$

т.к. $\Delta\Phi = 4,6^\circ$, принимаем значение полного геометрического угла поворота оправки

$$\Phi_r = 756^\circ.$$

Намоточный угол спирального слоя 2-ой зоны укладки при угле армирования $\varphi_2 = 25^\circ$ [109] равен $\Phi_n = \Phi_r = 756^\circ$, то в перерасчете на константу станка координата перемещения по "W":

$$U_{расч} = \frac{\Phi_n U_o}{360^\circ} = \frac{756 \cdot 50}{360} = 105,0 \text{ мм},$$

где $U_o = 50 \text{ мм}$ - константа станка.

Число лент спирального слоя:

$$k_l = \frac{h_{c25} \pi D \cos \varphi_2 10^5}{T k_{nc}} = \frac{0,086 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 10,8 \cdot \cos 25 \cdot 10^5}{102 \cdot 36} = 180.$$

Минимальное число лент в одном спиральном слое:

$$N_{\min}^{20} = \frac{2\pi D \cos \varphi_2}{a} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10,8 \cdot \cos 25}{0,7} = 88.$$

Определяем возможное число спиральных слоев:

$$\xi = \frac{k_l}{N_{\min}} = \frac{180}{88} = 2,05, \text{ то есть } \xi = 2.$$

Число лент в одном спиральном слое:

$$N = \frac{k_l}{\xi} = \frac{180}{2} = 90.$$

Для укладки необходимого числа лент АМ на поверхности изделия вычисляется дополнительный поворот оправки (смещение):

$$\Delta U = \frac{2U_o}{NK} = \frac{2 \cdot 50}{90 \cdot 10} = 0,111 \text{ мм},$$

где $K = 10$ - порядок симметрии текстурного слоя.

1.1.3 Спиральный слой 3-ой зоны укладки

Угол армирования на цилиндрической части принимаем $\varphi_3 = 50^\circ$.

Полный геометрический угол поворота оправки для спирального слоя 3-ой зоны укладки при угле армирования $\varphi_{cp}^3 = 50^\circ$:

$$\varphi_z^3 = 2(\Phi_u^3 + 2\Phi_\theta^3) = 2(563,0 + 2 \cdot 80) = 1046,0^\circ,$$

где $\Phi_\theta^3 = 80^\circ$ - угол поворота днища при укладке АМ;

$$\Phi_u^3 = \frac{360L_u \operatorname{tg} \varphi_{cp}^3}{\pi D} = \frac{360 \cdot 445 \cdot \operatorname{tg} 50}{3,14 \cdot 108} = 563,0^\circ - \text{угол поворота оправки при укладке}$$

АМ по цилиндрической части лейнера.

Намоточный (теоретический) угол поворота оправки из условия укладки ленты по всей поверхности изделия для спирального слоя 3-ей зоны укладки при угле армирования $\varphi_{cp}^3 = 50^\circ$:

$$\Phi_n^3 = 360n \pm \frac{360}{K} = 360 \cdot 3 + \frac{360}{1} = 1440^\circ$$

где $n = 3$;

$K = 1$ - порядок симметрии текстурного слоя.

Погрешность угла поворота:

$$\Delta\Phi = |\Phi_\Gamma - \Phi_n| = |1046,0 - 1440| = 6,0^\circ,$$

т.к. $\Delta\Phi = 6,0^\circ$, принимаем значение полного геометрического угла поворота оправки

$$\Phi_\Gamma = 1440^\circ.$$

Намоточный угол спирального слоя 3-ой зоны укладки при угле армирования $\varphi_3 = 50^\circ$ [109] равен $\Phi_n = \Phi_\Gamma = 1440^\circ$, то в перерасчете на константу станка координата перемещения по "W":

$$U_{расч} = \frac{\Phi_n U_o}{360^\circ} = \frac{1440 \cdot 50}{360} = 200 \text{ мм},$$

где $U_o = 50 \text{ мм}$ - константа станка.

Число лент спирального слоя:

$$k_{л} = \frac{h_{с50} \pi \gamma D \cos \varphi_3 10^5}{T k_{нс}} = \frac{0,177 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 10,8 \cdot \cos 50 \cdot 10^5}{102 \cdot 36} = 263.$$

Минимальное число лент в одном спиральном слое:

$$N_{\min}^{30} = \frac{2\pi D \cos \varphi_3}{a} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10,8 \cdot \cos 50}{0,7} = 62.$$

Определяем возможное число спиральных слоев:

$$\xi = \frac{k_l}{N_{\min}} = \frac{263}{62} = 4,24, \text{ то есть } \xi = 4.$$

Число лент в одном спиральном слое:

$$N = \frac{k_l}{\xi} = \frac{263}{4} = 66.$$

Для укладки необходимого числа лент АМ на поверхности изделия вычисляется дополнительный поворот оправки (смещение):

$$\Delta U = \frac{2U_o}{NK} = \frac{2 \cdot 50}{66 \cdot 1} = 1,515 \text{ мм},$$

где $K = 1$ - порядок симметрии текстурного слоя.

1.2 Кольцевой слой

Шаг укладки АМ в кольцевом слое при намотке в один слой:

$$C = \frac{Tk_{нк} \cdot 10^{-5}}{h_k \gamma} = \frac{102 \cdot 36 \cdot 10^{-5}}{0,111 \cdot 2,5} = 0,132 \text{ см/об},$$

где $k_{нк} = 36$ - количество нитей в ленте АМ кольцевого слоя.

Учитывая рекомендацию [35] о том, что шаг намотки должен быть в пределах $C = (0,9...1)a = (0,9...1)0,7 = 0,63...0,7 \text{ см/об}$, где $a = 0,7 \text{ см}$ - ширина ленты. Принимаем $C = 5,28 \text{ мм/об}$. Этот шаг соответствует укладке в 4 слоя, тогда для одного слоя:

$$U = \frac{U_o L_{ц}}{C} = \frac{50 \cdot 445}{5,28} = 4210 \text{ мм}.$$

2 Данные для намотки

Спиральный слой 1-ой зоны $\varphi_1 = 16,74^0$, $K = 3$, толщина 1,03 мм:

2 шт., 57 циклов (114 лент), смещение $\Delta U = 0,292 \text{ мм}$, $U = 83,625 \text{ мм}$.

Спиральный слой 2-ой зоны $\varphi_2 = 25^0$, $K = 10$, толщина 0,86 мм:

2 шт., 45 циклов (90 лент), смещение $\Delta U = 0,111 \text{ мм}$, $U = 105,111 \text{ мм}$.

Спиральный слой 3-ой зоны $\varphi_3 = 50^\circ$, $K = 1$, толщина 1,77 мм:

4 шт., 33 цикла (66 лент), смещение $\Delta U = 1,515\text{мм}$, $U = 201,515\text{мм}$.

Кольцевой слой, толщина 1,11 мм:

4 шт., $Z = 445\text{мм}$, $W = 4210\text{мм}$.

Схема укладки АМ: 1C₂₅, 2C₁₆, 2К, 1C₂₅, 4C₅₀, 2К

Материал, кол-во нитей: нить стеклянная марки ЕС6 34x3 Z80 П-10 ГОСТ 8325-93, линейной плотностью 102 текс, 36 нитей

3 Данные для контроля

Итоговое число проходов суппорта станка в процессе укладки армирующего материала равно 679 (по электромеханическому счетчику).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Технологическая программа намотки малогабаритного корпуса БК- 2 - 200

Толщина спирального слоя :0,143 см

Толщина кольцевого слоя : 0,25 см

Армирующий материал : нить стеклянная - ЕС 6 34Х 3 Z 80

Сбивка спирального слоя : - 0,26 (нулевая программа – 66,66)

Количество спиральных слоёв : - 2

Количество циклов спирального слоя: 2

Сбивка кольцевого слоя: X=3347

Количество кольцевых слоёв: 6

5	M3 M42 S 300 G 95 F18	170	X -32,712 Z 309,385
10	G1 X0 Z 4	175	X -33,872 Z 297,64
15	G 92 X0 Z0	180	X -34,162 Z 255,287
20	M0	185	X -34,742 Z 211,075
25	M3 M42 S300 G95 F18	190	X -35,612 Z 178,392
30	L85 H 64	195	X - 42,804 Z -6,498
35	L 255	200	X -43,384 Z -14,502
40	G 92 X0 Z0 F3,2	205	X -44,254 Z -27,552
45	G1 X -3347 Z -222	210	X -45,124 Z -41,501
50	G92 X0 Z0	215	X -52,954 Z -57,045
55	G1 X -347 Z 222	220	X -54,984 Z -49,911
60	G 92 X0 Z0	225	X -58,174 Z -37,992
65	G1 X -3347 Z 220	230	X -60,784 Z -27,523
70	G 92 X0 Z0	235	X -62,814 Z -17,634
75	G1 X -3347 Z 220	240	X -64,264 Z -6,469
80	L 320	245	X -66,920 Z 0 (сбивка)
85	G 92 X0 Z0 F 18	250	M 17
90	G 1 X -0,29 Z 16,704	255	G 92 X0 Z0 F 12
95	X -0,58 Z 30,624	260	G 1 X -0,290 Z 16,704
100	X -0,87 Z 61,132	265	X -0,580 Z 30,624
105	X -1,392 Z 87,841	270	X -0,870 Z 61,132
110	X -1,972 Z 109,156	275	X -1,392 Z 87,841
115	X -2,552 Z 136,01	280	X -1,972 Z 109,156
120	X -9,512 Z 301,207	285	X -2,552 Z 136,010
125	X -10,382 Z 320,492	290	X -3,100 Z 150,000
130	X -11,252 Z 331,106	295	X -4,200 Z 180,000
135	X -12,702 Z 344,649	300	X -8,000 Z 200,000
140	X -17,342 Z 353,379	305	X -20,000 Z 230,000
145	X -22,852 Z 370,836	310	X -40,000 Z 262,273
150	X -24,940 Z 361,063	315	M 17
155	X -26,390 Z 343,489	320	G 92 X0 Z0 F 18
160	X -29,000 Z 334,760	325	G 1 X -0,580 Z -55,000
65	X -31,030 Z 322,725	330	X -1,450 Z -88,000

335	X -8,642	Z -272,400
340	X -9,222	Z -280,500
345	X -10,092	Z -293,500
350	X -10,962	Z -307,500
355	X -18,792	Z -323,040
360	X -20,822	Z -315,910
365	X -24,012	Z -303,900
370	X -26,622	Z -293,500
375	X -28,652	Z -283,600
380	X -30,102	Z -272,460
385	X -32,752	Z -262,000
390	L 85 H 64	
395	G 92 X0 Z0 F 12	
400	G 1 X -0,290	Z 16,704
405	X -0,580	Z 30,624
410	X -0,870	Z 61,132
415	X -1,392	Z 87,841
420	X -1,972	Z 109,156
425	X -2,552	Z 136,010
430	X -3,100	Z 150,000
435	X -4,200	Z 180,000
440	X -8,000	Z 200,000
445	X -20,000	Z 230,000
450	X -40,000	Z 255,265
455	G 92 X0 Z0 F 3,2	
460	G 1 X -3347	Z -208,
465	G 92 X0 Z0	
470	G 1 X -3347	Z 210
475	G 92 X0 Z0	
480	G 1 X 50	Z 100
485	M 0	
490	M 5 M 30	
495	M 02	

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Расчёт ожидаемого экономического эффекта

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по НР ЛГУ им. В.Даля

докт. техн. наук, проф.

В.А. Ветренко

2015 г.



ожидаемого экономического эффекта от внедрения в производство результатов научно-исследовательской работы по совершенствованию технологии намотки малогабаритных корпусов летательных аппаратов из композиционных материалов

Разрабатываемая технология слоистых систем в основном используется для покрытий изделий из ПКМ, применяемых в конструкциях летательных аппаратов, а непосредственно для покрытия:

- баллонов давления гидро-, воздушно-, кислородных систем;
- подвесных топливных баков самолётов и вертолётов;
- твердотопливных ускорителей для самолётов и ракет;
- баллонов для хранения окислителя и топлива ракетно-космических систем;
- баллонов давления противопожарных систем;
- цилиндрических, конических и сложнопровильных частей самолётов, вертолётов и космических аппаратов;
- твердотопливных двигателей.

Полученный экономический эффект от внедрения разработанной технологии и оборудования её реализующего рассчитан на примере малогабаритной оболочки давления, используемой в конструкции самолёта для хранения газов под давлением, изготовленной намоткой из стеклонити покрытой плёнкой с наноматериалом (аэросилом).

Геометрические размеры оболочки: диаметр 150 мм, длина- 1500 мм, угол намотки спирального слоя 30°.

Исходные данные для расчета: усредненная стоимость снижения одного килограмма массы самолёта -500 у.е./кг, оптовая цена стеклонити ЕС - 30 у.е./кг, оптовая цена аэросила (нанонаполнителя) – 60 у.е./кг, расчётное разрушающее давление 30 МПа, плотность АМ-2,5 кг/дм³.

Полная экономическая эффективность на одно изделие за счет экономии АМ:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m + \mathcal{E}_э, \quad (4.1)$$

где,

\mathcal{E}_m - экономическая эффективность на стадии производства за счет экономии АМ;

$\mathcal{E}_э$ - экономическая эффективность на стадии эксплуатации

$$\mathcal{E}_m = \Delta M * C_m, \quad \mathcal{E}_э = \Delta M * C_э, \quad (4.2)$$

где,

ΔM - массовая эффективность от внедрения разработанной технологии и оборудования;

$C_m, C_э$ - оптовая цена армирующего материала и нанонаполнителя, стоимость снижения массы самолётной конструкции;

$$\Delta M = M_{\text{баз}} - M_{\text{нов}}, \quad (4.3)$$

где,

$M_{\text{баз}}$ - масса АМ в цилиндрической части оболочки, изготовленной по базовой технологии;

$M_{\text{нов}}$ - масса АМ в цилиндрической части оболочки, изготовленной по новой технологии.

Масса АМ в цилиндрической части малогабаритной оболочки давления определяется из выражения:

$$M = \pi d h l \gamma, \quad (4.4)$$

где,

d - диаметр малогабаритной оболочки давления;

h - усредненная толщина стенки оболочки с учетом связующего;

l - длина оболочки;

γ - плотность АМ.

Производим расчёт толщины стенки цилиндрической части малогабаритной оболочки, изготовленной по базовой технологии (баз) и по новой технологии (нов), используем прочностные характеристики АМ из приложения В.

$$h_c = \frac{Pd}{4Rc \cos^2 \varphi}, \quad (4.5)$$

$$h_k = \frac{Pd|2-Rchc \sin^2 \varphi}{Rk}, \quad (4.6)$$

$$h_b = h_{cb} + h_{kb} = 0,122(\text{мм})$$

$$h_n = h_{cn} + h_{kn} = 0,092(\text{мм})$$

$$M_{cb} = 1,259 \text{ (кг)}, M_{нов} = 0,942 \text{ (кг)} \Delta M = 0,316 \text{ (кг)}$$

$$\Delta M = 79 \text{ у.е.}, \Delta \varepsilon = 158 \text{ у.е.} \quad \Delta = 237 \text{ у.е.}$$

Произведённый расчёт показал, что использование результатов проведенных исследований позволяет получить экономический эффект только на одном типовом малогабаритном изделии 237 у.е.

Особенно можно отметить эффективность применения оболочек покрытых тонкой пленкой в ракетной технике в качестве твердотопливных двигателей, т.к. конструкция такого двигателя представляет собой цилиндрическую оболочку, изготовленную непрерывной намоткой армирующего материала. Таким образом, существенное облегчение конструкции ЛА за счет более эффективного использования армирующего материала позволит сократить число или размер первых ступеней, размер силовой установки или количество топлива и тем самым создаются условия для удешевления системы в целом.

Ученый секретарь

к.т.н., доц.

Л.И. Семеняка

Исполнитель н. с.

Г.В. Сыровой

Соответствует оригиналу:

ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.014.02


Р.М. Грубка

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Акты испытания и внедрения результатов работы

МЧП «ДОНБАСС - СЕРВИС»

91020 г. Луганск, ул. Руднева, 123, тел. 59-94-54


 УТВЕРЖДАЮ
 Директор МЧП «Донбасс-сервис»
 А.Л. Антипов
 « » 2016 г.

АКТ

внедрения технологического процесса намотки малогабаритного корпуса «Пробоотборник ПБМ-2-200» и Пробоотборник ПБМ-4-200» на основе наномодификаторов в МЧП «Донбасс-сервис»


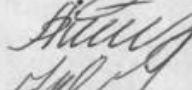

Кафедрой станки, инструменты и инженерная графика Луганского национального университета имени Владимира Даля выполняются научно-исследовательские работы по разработке технологии и оборудованию для технологического процесса намотки малогабаритных конструкций на основе полимерных композитных материалов.

Одним из направлений этой работы является разработка технологического обеспечения намотки малогабаритных корпусов на основе наномодифицированных добавок. Разработанная общая методика технологического процесса намотки на основе изменения структуры намотки в переходных намоточных зонах и наномодификации, представленная в диссертационной работе Сырового Геннадия Владимировича, а также разработанное оборудование для намотки и испытания малогабаритных корпусов используемая на предприятии «Донбасс-сервис» при изготовлении корпусов «Пробоотборник ПБМ-2-200» и Пробоотборник ПБМ-4-200» предназначенных для отбора проб газа в нефтегазодобывающей промышленности России.

Экономический эффект от использования представленной методики, позволивший снизить массу корпуса составил 340000 руб. (триста сорок тысячи руб.) на опытную партию (100 штук) изделия «Пробоотборник ПБМ-2-200» и Пробоотборник ПБМ-4-200».

Председатель комиссии:

Члены комиссии:

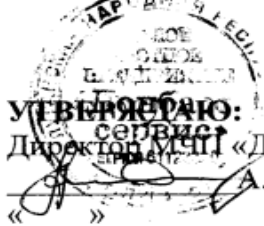

 А.В. Косув

 Э.В. Антипова

 Н.В. Ямченко

Соответствует оригиналу:

ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.014.02



Р.М. Грубка


УТВЕРЖАЮ:
 Директор МЦП «Донбасс-сервис»
 А.Л. Антипов
 2014 г.

АКТ ИСПЫТАНИЯ
малогабаритного корпуса с теплоизоляцией типа «Колибри»
согласно хоздоговорной темы М 21-07 «Разработка технологий
изготовления корпуса с теплоизоляцией изделия «Калибри»

Кафедрой инженерного и компьютерного моделирования Луганского национального университета имени Владимира Даля выполняются научно-исследовательские работы по разработке технологии и оборудованию для технологического процесса намотки малогабаритных конструкций.

В соответствии с темой М 21-07 «Разработка технологий изготовления корпуса с теплоизоляцией изделия «Калибри» на кафедре «Графического и компьютерного моделирования» Луганского национального университета имени В. Даля соискателем Сыровым Геннадием Владимировичем была отработана технология и изготовлена опытная партия изделия в количестве 12 шт методом продольно-поперечной и спирально-кольцевой намотки на основе использования наномодификаторов.

1. Результаты измерений

Измерительный, визуальный контроль намотанного изделия «Калибри» показал соответствие ТУ, чертежам и требованиям, отсутствие поверхностных и внутренних дефектов.

2. Результаты гидравлических испытаний

Во время испытаний трех корпусов при нарастании гидравлического давления обнаружено нарушение герметичности при значениях гидравлического давления: в корпусе № 1 - 70 кгс/см²; в корпусе № 2 - 80 кгс/см²; в корпусе № 3 - 100 кгс/см².

При этом корпуса сохранили свою форму и механические повреждения не обнаружены.

3. Результаты наблюдений

Во время указанных гидравлических давлений произошла разгерметизация корпусов и появились струйки воды:

На корпусе №1 в зоне перехода цилиндрической поверхности корпуса в коническую. На корпусе №2 в нескольких местах конической и цилиндрической поверхностях. На корпусе №3 в зоне перехода цилиндрической поверхности корпуса в коническую, и в нескольких местах конической поверхности.

Нарушения герметизации в местах крепления втулок с органопластиком не наблюдалось.

Выводы:

1. Изготовленные намоткой корпуса соответствуют требованиям измерительного контроля.

2. Испытания на герметичность и механическую прочность при воздействии гидравлического давления от 69 до 98 МПа (от 70 до 100 кгс/см²) корпуса Э251.475.01.000.0 выдержали.

Председатель комиссии:

А.В. Косув

Члены комиссии:

Э.В. Антипова

Н.В. Ямченко

Соответствует оригиналу:

ученый секретарь диссертационного
 совета Д 01.014.02

Р.М. Грубка

Р.М. Грубка

«УТВЕРЖДАЮ»

Председатель Правления



ПАО «Завод горноспасательной
техники «Горизонт»

В.Г. Пивоваров

2014 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

об использовании результатов диссертационной работы соискателя Г.В. Сырового на соискание ученой степени кандидата технических наук по оптимизации технологии намотки малогабаритных корпусов летательных аппаратов из композиционных материалов

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер Омельченко Эдуард Николаевич, заместитель директора по качеству Степанов Юрий Николаевич, главный технолог Попов Владимир Николаевич составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Сырового Геннадия Владимировича внедрены в ПАО «Завод горноспасательной техники «Горизонт» в виде технологии изготовления и технологических программ намотки малогабаритных баллонов высокого давления БМП(С)- 200, БМП(О)- 300 (1-7 литров) устанавливаемых на аппараты защиты АСВ-2 и АВХ, а также индивидуальных средств спасения Горноспасатель-10, Горноспасатель-11.

Внедрение в ПАО «Завод горноспасательной техники «Горизонт» результатов диссертационной работы Г.В. Сырового позволило заменить стальные металлические баллоны, ранее используемые предприятием на металлопластиковые баллоны как наиболее совершенные по массе и технологичности.

Главный инженер

Э.Н. Омельченко

Заместитель директора

Ю.Н. Степанов

по качеству

Главный технолог

В.Н. Попов

Соответствует оригиналу:

ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.014.02

Р.М. Грубка



Соответствует оригиналу:

ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.014.02

Р.М. Грубка

Р.М. Грубка



Соответствует оригиналу:

ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.014.02

Р.М. Грубка

Р.М. Грубка