

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Публичное акционерное общество
«Научно-производственное объединение «Искра»

На правах рукописи

Рогожникова Елена Николаевна



**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ КОРПУСОВ РДТТ ПРИ ЧАСТИЧНОМ РАССЛОЕНИИ
УЗЛОВ СТЫКА**

Специальность 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические
установки летательных аппаратов

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Бульбович Роман Васильевич
д.т.н., профессор

Пермь 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ВЛИЯНИЕ НЕСПЛОШНОСТИ НА НДС МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ.....	14
1.1 Особенности технологии изготовления тонкостенных цилиндрических конструкций летательных аппаратов из композиционных полимерных материалов. Образование технологических дефектов.....	15
1.2 Анализ характеристик несплошности при изготовлении многослойных композиционных цилиндрических объектов.....	26
1.3 Расчетные модели оценки прочности материала и несущей способности конструкций из цилиндрических композиционных материалов с дефектами типа «межслоевые расслоения».....	28
Выводы по главе 1.....	31
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕСПЛОШНОСТИ КОМПОЗИТА НА ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ.....	32
2.1 Объект исследований.....	34
2.2 Экспериментальное оборудование и экспериментальный план проведения исследований.....	36
2.3 Результаты определения прочности кольцевых образцов из КМ с межслойным расслоением.....	38
2.4 Коэффициент несплошности.....	41
Выводы по главе 2.....	43
3 ВЛИЯНИЕ РАССЛОЕНИЙ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ.....	45
3.1 Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и оценка прочности цилиндрической оболочки из разнородных композиционных материалов.....	45
3.2 Влияние кольцевых несплошностей на прочность штифто-шпилечного соединения в композитных корпусах.....	68
3.3 Влияние появления межслоевых дефектов на работоспособность резьбового соединения в композитном материале.....	73
Выводы по главе 3.....	81

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОРПУСОВ РДТТ ПРИ ЧАСТИЧНОМ РАССЛОЕНИИ УЗЛОВ СТЫКА	83
4.1 Алгоритм расчета	83
4.2 Расчет эффективных упругих характеристик многослойных пакетов, секторов цилиндрической многослойной конструкции из разнородных материалов	93
Выводы по главе 4.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
Приложение А Диаграммы значений нагрузки от перемещений, полученные при испытании	123
Приложение Б Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебном процессе.....	130
Приложение В Акт научно-технической комиссии о внедрении «Методики диагностики технического состояния РДТТ при частичном расслоении узлов стыка»	131

ВВЕДЕНИЕ

В начале 60-х годов ракетно-космическая отрасль приступила к реализации идеи использования композитов для изготовления силовых конструкций минимального веса с необходимой прочностью и жесткостью. Эта идея, заимствована у природы, и предполагает соединение в одну структуру разных по свойствам материалов: податливой матрицы и прочной жесткой арматуры. В дальнейшем обнаружилось, что идея армирования глубже, чем технологичность и прочность: композиты – это единственные материалы, у которых увеличение прочности сопровождается ростом вязкости разрушения, что приводит к повышению надежности и износостойкости материала [52, 94, 104].

Обширную номенклатуру материалов, на сегодняшний день, составляют композиты, создаваемые из полуфабрикатов – армированных волокон (органо-, стекло-, угле-бороволокна) и матрицы (полимерной, керамической, металлической, углеродной) – совместно с конструкцией. Такому успеху в развитии продвижения в практику использования современных конструкционных волокнистых материалов способствовала уникальная механика композитов. Именно механика композиционных материалов стала научной основой для описания, понимания, контроля и предсказания конструкционных свойств и всего многообразия технологий формирования таких материалов и изделий из них [36].

Вопросы проектирования, разработки технологического процесса и оптимального армирования не могут рассматриваться изолировано и выступают тремя сторонами единой проблемы при создании конструкций из композитов [62, 78, 105, 111]. Структура композита определяет механические свойства материала на уровне армирующих элементов: управлять полями сопротивления материала можно в определенных пределах управляя укладкой волокон и подстраивая их под действующие нагрузки [66, 106, 113]. Композиты открывают возможности разработки принципов оптимального проектирования. Именно композиционные

материалы материализовали эту ветвь механики деформируемого твердого тела [50, 59, 102, 130]. Вопросы технологии переработки, в процессе которой формируется весь комплекс свойств создаваемого изделия из композита, оказываются ключевыми в расширении практики композиционных материалов в различных областях современной техники [33, 62]. Конструкции из композита, имеющие полимерную матрицу, чувствительны к температурной и силовой предыстории, технологии изготовления [54]. Возможности технологии изготовления композитов велики, но не безграничны, поэтому ограничения в технологии проектирования и изготовления играют значительно большую роль, чем при создании конструкций из металлов [69]. Характеристики, определяемые матрицей особенно чувствительны к параметрам намотки (формования), сопротивлению поперечному отрыву и межслойному сдвигу. Так проблема «технология – прочность» увеличивает интерес к поиску оптимальных законов укладки арматуры, механике намотки, режимов формования и отверждения с целью снижения вероятности образования дефектов в виде расслоений и растрескиваний. Причиной этих внутренних структурных повреждений готовых конструкций могут быть не только технологические факторы. Как бы рационально не было спроектировано и аккуратно изготовлено изделие, ни один материал в его составе не может сохранить свои свойства неограниченно долго. Даже в обычных условиях прочность, жесткость и долговечность композитов снижается в результате внутренних повреждений материала под воздействием эксплуатационных факторов. Таким образом, возникает вопрос о способности конструкции воспринять ту нагрузку, которая предусмотрена основным расчетным случаем, а в ряде случаев, речь идет, и об остаточной прочности несущей конструкции [38, 109].

Повреждения, возможные в слоистых композитах, могут проявляться как на микро-, так и на макроуровне. На микроуровне (в монослое, составленном из волокон и связующего) они проявляются в виде микродефектов – трещин, обусловленных, в основном, несовершенством технологии. На макроуровне (в толще пакета, составленного из монослоев с произвольной укладкой по его

толщине) многообразие видов повреждений оказывается независимым и от схемы укладки монослоев, и от технологии изготовления конструкции, и от цикличности ее нагружения в период, предшествующий эксплуатационному случаю нагружения. Именно в этот период дефекты (или повреждения структуры композита), вносимые начальными технологическими несовершенствами в виде пустот или трещин, разрывов волокон, растрескивания матрицы и потери сцепления на поверхности раздела волокно-матрица, могут получить развитие и критическим образом сказаться на несущей способности конструкции. По этой причине хорошо развитые направления «структурной механики твердого тела», такие как теоретические методы описания реальных конструкций из КМ, получение деформируемых систем из КМ с заданными свойствами, технологии получения материалов и конструкций, должны быть дополнены исследованиями чувствительности конструкции к начальным несовершенствам структуры и последующим анализом снижения несущей способности в зависимости от повреждения и его распространенности в объеме материала конструкции.

Создание композитной конструкции без каких-либо структурных дефектов, чаще всего не обеспечивается уровнем совершенства современного технологического процесса изготовления. Актуальной является научно-техническая задача – обеспечение и прогнозирование работоспособности композитных конструкций на уровне имеющихся структурных дефектов. Решение поставленной задачи должно базироваться на использовании совершенной системы контроля качества изделий, позволяющей получать достоверную информацию о наличии и характеристике дефектов в слоистой конструкции. На основе анализа механического поведения композитной конструкции, обладающей теми или иными дефектами и находящейся под действием эксплуатационной нагрузки, могут быть даны рекомендации о допустимости или недопустимости дефектов, чувствительности методики к их обнаружению, а при необходимости, – внесению изменений в технологический процесс армирования материала конструкции.

В современном ракетостроении широкое применение имеют корпуса из полимерно - композиционных армированных материалов (ПКМ), формируемых совместно с вулканизацией теплозащитных, герметизирующих и антидиффузионных слоев. Корпуса из ПКМ следует отнести к сложным технологическим объектам с точки зрения НДС, так как используемые конструкционные материалы обладают особыми свойствами по объемному расширению и усадочным явлениям. Актуальной задачей с позиции обеспечения работоспособности РДТТ в процессе технологических переделов и эксплуатации является исследование взаимодействия контактирующих границ и оценка напряженно-деформированного состояния элементов конструкции как численными, так и экспериментальными методами.

В России не существует четко выработанной и регламентированной методики проектирования и сертификации композиционных структур на данный момент [25, 26]. В то время как за рубежом достаточно давно разработан и широко используется подход для квалификации композитных конструкций [8]. Этот подход использовался в программах проектирования в авиа, ракетостроении задолго до начала применения КМ. Данный метод предъявляет наиболее жесткие требования по сертификации композитных структур, ввиду таких их особенностей как чувствительность к нагрузкам параллельным плоскости слоя, многообразие возможных форм разрушения, чувствительность к условиям эксплуатации. Эти особенности и существующие внутренние дефекты КМ приводят, с одной стороны, к повышению требований, предъявляемых к расчетным методикам для учета особенностей механического поведения КМ, а с другой стороны, к увеличению объема экспериментальных исследований, поскольку только расчетными методами невозможно спрогнозировать поведение полноразмерных структур по свойствам материалов, определенным на макроуровне.

При обосновании проектных решений конструкций из композитов необходимо учитывать многообразие потенциальных форм разрушения. Чувствительность материалов к условиям окружающей среды, наличие

внутренних дефектов, приложение нагрузок не в плоскости слоя приводят к появлению различных форм разрушения композиционных структур.

Надежный анализ прочности и деформирования элементов особенно необходим в случае авиастроения. Конструкторско-технологический анализ изготавливаемых узлов должен проводиться для внедрения деталей из композитов. Современный подход предполагает широкое использование математических моделей деталей и узлов из композитов к созданию крупногабаритных конструкций из КМ. Использование математических моделей при проектировании и расчете имеет важное значение для оптимизации процессов разработки. Особенности конструктивной реализации крупногабаритных изделий предполагают наличие разнообразных разъемных, например, штифто-шпилечных соединений. Трудно-прогнозируемое сложное, напряженно-деформированное состояние реализуется в зоне соединений этих элементов. Для увеличения прочности, соединительные узлы разъемных композитных конструкций традиционно разрабатываются в виде закладных металлических элементов. КМ сильно анизотропны, в отдельных направлениях они имеют очень низкие прочностные свойства, например, наименьшая прочность слоистых ПКМ связана с межслойными напряжениями – в 20-30 раз ниже прочности в плоскости слоя. В связи с этим концентрация напряжений в зоне контакта «ПКМ – металл» совместно с технологическими напряжениями могут привести к возникновению расслоений в конструкции еще до начала эксплуатации.

Характерно также, что в результате действия на полуфабрикат полимерного композиционного материала физических и химических процессов (кристаллизация, отверждение), внешних сил, теплового воздействия, которые в материале протекают не одновременно и сопровождаются изменением объема, возникают технологические напряжения на стадии формования. После завершения указанных физических и химических процессов, которые улучшают или ухудшают эксплуатационные характеристики, в конструкции появляются остаточные напряжения, действующие в течение всего назначенного срока эксплуатации [39].

При механической обработке (сверление, открытие отверстий) деталей из композита согласно [58, 90, 91] иногда возникают непредсказуемые дефекты, такие как отслоение и вырыв волокна. Из-за возникших дефектов резко снижаются свойства материала и потенциальные возможности сформированной материальной структуры, что приводит к ухудшению прочности конструкции и увеличению вероятности появления отказа в процессе эксплуатации.

Действующая технология изготовления высоконагруженных тонкостенных конструкций из КМ летательных аппаратов требует решения вопросов регламентации (ограничений) возникающих дефектов в связи с существованием расслоений. Для решения этой задачи необходима своевременная оценка влияния появившихся дефектов на напряженно-деформированное состояние конструкции с учётом расположения и размеров локального расслоения [65].

Подводя итог сказанному, актуальным в части обеспечения надёжности РДТТ при эксплуатации является создание методики диагностики технического состояния корпусов РДТТ из композитных материалов, имеющих расслоение. Методика должна включать комплекс экспериментальных исследований физико-механических свойств различных композитных материалов на образцах с внесёнными расслоениями; программный продукт, позволяющий исследовать НДС композитных оболочек, составленных из разнородных композиционных структур и имеющих межслойные расслоения; критерии, связывающие уровень расслоения с прочными ресурсами конструкции. Методика на основе неразрушающих методов контроля и разработанных норм дефектности [84] должна позволять надёжно оценивать качество продукции (корпусов) и возможность последующей эксплуатации.

Целью диссертации является разработка методики диагностики технического состояния корпусов РДТТ из композиционных материалов при частичном расслоении узлов стыка.

Для достижения заявленной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ уровня имеющихся несплошностей на переднем и заднем узлах стыка корпуса РДТТ в местах вскрытия отверстий под штифто-шпилечное соединение.
2. Экспериментальная оценка влияния уровня расслоений на снижение предела прочности композитного материала с использованием образцов с внесёнными расслоениями.
3. Разработка математической модели и программного обеспечения на основе метода конечных элементов, позволяющей проводить трёхмерный анализ напряженно-деформированного состояния композитных оболочек, составленных из разнородных композиционных структур и имеющих межслойные расслоения.
4. Проведение численных исследований НДС композитного корпуса с расслоениями, соответствующими реальному уровню технологии изготовления, с оценкой влияния межслоевых дефектов на работоспособность соединительного узла и несущую способность резьбового соединения в композитном материале и допустимости уровня имеющихся расслоений в зоне штифто-шпилечного соединения многослойной композиционной оболочки.
5. Разработка расчетно-экспериментальной методики диагностики технического состояния корпусов РДТТ из композитных материалов при частичном расслоении узлов стыка.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые в отрасли проведен анализ уровня несплошности в изготовленных корпусах, обеспечивший исходную информацию для постановки задачи математического моделирования прочностного состояния корпуса двигателя и оценки статической прочности на основе анализа НДС композитных конструкций с учетом несплошностей.
2. Проведены испытания предварительно подготовленных кольцевой намоткой образцов с внесенными расслоениями, которые позволили оценить влияние уровня расслоения, определяемого введённым коэффициентом

несплошности k на деформационные и прочностные свойства КМ. Наибольшее снижение предела прочности материала до 17 % наблюдалось при коэффициенте несплошности $k = 0,08$ (приложение нагрузки под углом 45^0 относительно периферии расслоения).

3. Разработана математическая модель и программное обеспечение на основе метода конечных элементов, позволяющая проводить трёхмерный анализ напряженно-деформированного состояния композитных оболочек, составленных из разнородных композиционных структур и имеющих межслойные расслоения.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке алгоритма поэтапного исследования НДС конструкции, состоящей из разнородных композитных структур с имеющимися межслойными расслоениями.

Практическая значимость работы связана с прикладной направленностью работы на создание методики прогнозирования НДС металлокомпозитных узлов стыка при наличии локальных расслоений. Предложенная методика позволяет оценить уровень критичности имеющихся расслоений и принять решение о годности изготовленной продукции.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в работе задач при экспериментальном исследовании НДС кольцевых образцов с расслоениями использовался метод испытания на растяжение кольцевых образцов, для численного исследования НДС конструкции был применен метод конечных элементов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты несплошности, определённые в изготовленных корпусах.
2. Результаты испытаний предварительно подготовленных кольцевой намоткой образцов с внесенными расслоениями.
3. Математическая модель и программное обеспечение на основе метода конечных элементов, позволяющая проводить трёхмерный анализ напряженно-деформированного состояния композитных оболочек, составленных из разнородных композиционных структур и имеющих межслойные расслоения.

4. Результаты исследования влияния расслоения на напряженно-деформированное состояние корпуса в зоне штифто-шпилечного соединения многослойной композиционной оболочки, позволившие определить уровень снижения несущей способности резьбового соединения при появлении межслоевых дефектов в композитном материале.

5. Методика диагностики технического состояния корпусов РДТТ, изготовленных из композитов и имеющих частичное расслоение узлов стыка.

Степень достоверности результатов подтверждена верификацией результатов расчёта НДС крупногабаритной многослойной конструкции, полученных по разработанному алгоритму прогнозирования жесткости и прочности НДС на основе экспериментального исследования радиальных перемещений силовой оболочки, нагруженной внутренним давлением и применением программного комплекса ANSYS Workbench, хорошо зарекомендовавшего себя для моделирования напряженно-деформированного состояния крупногабаритных многослойных конструкций под действием внутреннего давления.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы и результаты исследований доложены и обсуждены: на Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмической техники, инновации и высоких технологии» (Пермь, 2016г., 2017г., 2018г., 2019г., 2020г.); Всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов НПО «Искра» (Пермь, 2016г., 2018г., 2019г.); Всероссийской научно-технической конференции, посвященная 110-ю со дня рождения первого главного конструктора М.Ю. Цирульникова, молодых специалистов НПО «Искра», (Пермь, 2017г.); XXXVIII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологии, посвященной 75-летию Южно-Уральского государственного университета (Миасс, 2018г.); XI Всероссийской конференции по исследованиям и испытаниям мат-ов «ТестМат» по теме «Физико-механические испытания, надежность, высокотемпературные испытания, прочность» (Москва, 2019г.); Молодежной научно-технической

конференции «Взгляд в будущее - 2019» (С-Петербург, 2019г.); V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Материалы и технологии XXI века» (Бийск, 2019г., 2022г.).

Основное содержание, изложение диссертации и результаты полученных исследований опубликованы в 12 статьях: в их числе - 4 статьи, входящие в перечень ВАК РФ и Scopus.

Работа состоит из введения (актуальности выбранной темы), четырех глав, выводов (результатов исследования), списка использованных источников литературы и приложения с Актами внедрения и результатами проведенных испытаний. Работа изложена на 132 страницах, включая 15 таблиц, 58 рисунков, 145 наименования литературных источников. Приложение на 10 страницах.

1 ВЛИЯНИЕ НЕСПЛОШНОСТИ НА НДС МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

В данной главе на основе обзора литературных источников проведен анализ причин образования дефектов типа расслоений между слоями в тонкостенных конструкциях из волокнистых полимерных композиционных материалов (ПКМ).

В России не существует четко выработанной и регламентированной методики проектирования и сертификации композиционных структур на данный момент. В то время как за рубежом уже давно разработан и широко используется подход для квалификации композитных конструкций [8]. Этот подход использовался в программах проектирования в авиа, ракетостроении задолго до начала применения КМ. Данный метод предъявляет наиболее жесткие требования по сертификации композитных структур, ввиду таких их особенностей как чувствительность к нагрузкам параллельным плоскости слоя, многообразие возможных форм разрушения, чувствительность к условиям эксплуатации. Эти особенности и существующие внутренние дефекты КМ приводят, с одной стороны, к повышению требований, предъявляемых к расчетным методикам для учета особенностей механического поведения КМ. С другой стороны, к увеличению объема экспериментальных исследований, поскольку только расчетными методами невозможно спрогнозировать поведение полноразмерных структур по свойствам материалов с низшего этапа.

При обосновании и проектировании конструкций из композитов необходимо учитывать многообразие потенциальных форм разрушения. От чувствительности материалов к условиям окружающей среды, внутренних дефектов и нагрузкам не в плоскости слоя в основном происходят многие формы разрушения композиционных структур [48, 107, 134, 136].

Низкая межслоевая прочность КМ делает их чувствительными к нагрузкам параллельным плоскости слоя. Наиболее сложные нагрузки при проектировании - это нагрузки, возникающие в полногабаритных сборных конструкциях. Существующие инструменты инженерного анализа зачастую принимают эти

нагрузки как вторичные, что существенно понижает точность. Таким образом, важно учитывать все возможные нагрузки и возможные модели разрушения, что осуществимо при использовании экспериментальных данных, получаемых путем тщательно спланированной программы испытаний.

Корректное моделирование форм разрушения играет важную роль в модульных программах исследований. Так как формы повреждений часто зависят от условий испытаний, изначальной дефектности структуры композита (производственные дефекты, недостатки конструкции, случайные повреждения и др.), то важно тщательно выбирать образцы для испытаний [55, 97].

В идеале, если инструменты прочностного анализа достаточно изучены и установлены критерии разрушения, то прочностные свойства могут быть спрогнозированы по свойствам компонентов материала [143]. Однако, в настоящее время современные расчетные методы не позволяют с достаточной степенью точности получить решение такой задачи и экспериментальные данные с низшего уровня проектирования часто не могут использоваться для корректного прогнозирования свойств структурных элементов и компонентов на более высоком уровне. Точность прочностных расчетов снижается за счет вариативности свойств материалов, наличия дефектов, масштабного эффекта.

1.1 Особенности технологии изготовления тонкостенных цилиндрических конструкций летательных аппаратов из композиционных полимерных материалов. Образование технологических дефектов

К тонкостенным конструкциям цилиндрической части летательных аппаратов предъявляются определенные требования по прочности, жесткости, точности, герметичности и другим эксплуатационным характеристикам, которые диктуются условиями их изготовления и эксплуатации. В ПКМ так же, как и традиционных конструкционных материалах могут возникнуть различного рода дефекты, связанные с нарушением целостности и однородности. Это обусловлено, прежде всего, недостаточной разработанностью стандартных технологических

процессов, полностью исключаящих возможность возникновения различного рода дефектов. Большое разнообразие ПКМ, высокая чувствительность их механических характеристик к изменению конструктивных и технологических параметров ведет к тому, что при проектировании конструкций из современных ПКМ необходимо учитывать технологические факторы в большей степени, чем для традиционных материалов.

Наибольшее распространение ПКМ получили для изготовления оболочек вращения летательных аппаратов в силу высоких требований к весовой эффективности этих конструкций. Самым распространенным способом переработки КМ для оболочечных конструкций является способ намотки. Это объясняется тем, что данный способ в отличие от других, позволяет на одном и том же оборудовании изготавливать детали с широким варьированием конструктивных решений, геометрии, габаритов, схем армирования при полной механизации и даже автоматизации процесса [16, 31, 34, 69, 99, 101]. Технологический процесс переработки ПКМ складывается из следующих этапов [132]:

1. Намотка на оправку армирующих элементов, пропитанных связующим.

При «мокром» способе полимерная матрица находится в вязко-упругом состоянии, при «сухом» - частично заполимеризована. На этом этапе необходимо обеспечить заданную плотность материала и нужную степень начального натяжения арматуры.

2. Разогрев конструкции на оправке до температуры отверждения.

На этапе намотки по «мокрому» способу (на подогретую оправку при «сухом» способе) и при последующем разогреве вязко-текучее связующее мигрирует под действием давления натяжения от внутренних слоев к наружным и от середины к торцам: происходит радиальное уплотнение материала и падение предварительного натяжения арматуры, что влияет на интегральные механические характеристики ПКМ.

3. Опрессовка на оправке наружным давлением.

Режим опрессовки ПКМ (температура, время приложения давления, величина давления) влияет не только на степень армирования, но и на пористость. Наличие значительного количества пор снижает механические свойства особенно определяемые свойствами матрицы, прочность при межслоевом сдвиге и сжатии.

4. Полимеризация связующего.

Этот этап один из наиболее важных, так как в основном определяет качество готовой продукции. В это время происходят физико-механические и химические процессы – образование молекулярной и подмолекулярной структуры, переход полимерной матрицы в упруго-вязкие состояния, идут адсорбционные процессы, химическая усадка.

5. Охлаждение материала вместе с оправкой.

Этот процесс разбивается на два под этапа. Охлаждение до температуры стеклования и охлаждение до конечной температуры. Этап охлаждения до температуры стеклования сопровождается развитием температурных деформаций, происходит переход полимерной матрицы в новое состояние. В этот момент могут создаваться условия для образования макродефектов в виде искривления арматуры и расслоений. Охлаждение на заключительном этапе термообработки приводит к появлению технологических температурных напряжений, обусловленных анизотропией механических и теплофизических свойств. Эти технологические температурные растягивающие радиальные напряжения соизмеримы с трансверсальной прочностью слоистого материала и являются основной причиной образования трещин, расслоений.

6. Механическая обработка.

При сверлении, обрезке, перфорации, фрезеровании и точении деталей возникают дефекты, такие как вырыв и отслоение волокна. Из-за данных дефектов резко увеличивается вероятность появления отказа оборудования и снижается ресурс конструкции в процессе эксплуатации, что в целом приводит к снижению потенциальных возможностей сформированной материальной структуры элемента, противостоять усталостным напряжениям [90]. Отслоения

являются основным параметром, полученных в результате сверления дефектов. В работах исследователей Wong T.L. [13] и Stone R. [11] приведена статистическая информация мировой авиационной практики, показано, что отказ деталей, состоящих из композиционного материала, из-за расслоения, обусловленных процессами сверления и фрезерования достигают до 60% от общего объема. При воздействии режущего инструмента основные дефекты поверхности КМ следующие: вырывы и сколы на торцах; большая волнистость; неравномерная шероховатость; расслоение волокна, ворсистость; отклонение формы и взаимного расположения поверхностей, трещины и царапины; [91].

Несплошности, дефекты в ПКМ имеют разнообразную природу, возникают и развиваются в зависимости от механических и химико-физических процессов, протекающих на любом этапе технологического цикла. Достаточно полная классификация дефектов в ПКМ приведена в работе [133]. Автор разделяет технологические дефекты волокнистых КМ на две группы: дефекты возле концов волокон и дефекты полимерной матрицы, вызванные нарушением сплошности. В изделиях, получаемых намоткой, дефекты первой группы образуются вследствие разрушения армирующих волокон в процессе уплотнения при натяжении на этапе намотки. Во вторую группу дефектов входят технологические дефекты в виде различных инородных включений; трещины полимерной матрицы по концам армирующих волокон; трещины в полимерной матрице, возникающие вследствие действия растягивающих радиальных напряжений; текстурная волокнистость. По линейному масштабу механики разрушения все дефекты в полимерных материалах разделяются на три группы: субмикроскопические, микроскопические, макроскопические.

К субмикроскопическим относят дефекты, соизмеримые с диаметром элементарного волокна. Примером субмикроскопических дефектов служат нарушения склейки на границе раздела компонентов, а также субмикроскопические трещины, поры в полимерной матрице. Этот вид дефектов влияет в основном на средний уровень физико-механических свойств КМ.

К микроструктурным дефектам, кроме газовых включений и микротрещин, относятся зоны с неравномерной плотностью, с разрушенной или поврежденной арматурой. С точки зрения эксплуатационных свойств изделий эти дефекты опаснее субмикроскопических дефектов, так как они более резко снижают средние значения физико-механических свойств и кроме этого повышают неоднородность материала. Исследования влияния этих дефектов на работоспособность конструкций показало, что наличие большинства из них можно учесть косвенным образом при определении упругих и прочностных характеристик материала.

Наиболее опасны и приносят больше неприятностей макроскопические трещины, расположенные в межслоевых прослойках связующего. Макроскопические дефекты представляют межслоевые расслоения и текстурную волнистость. Каждый вид микроструктурных дефектов порождается определенными группами технологических факторов. Так сферические поры возникают из-за захвата армирующим материалом воздуха при намотке, вследствие некачественной пропитки, а так же из-за выделения летучих при нагреве полуфабриката.

Наличие дефектов текстурной волнистости приводит к снижению прочностных и жесткостных характеристик готовых намоточных тонкостенных конструкций. Различие в направлении армирования значений модуля упругости для материалов с идеальными и изогнутыми волокнами составляет 24 - 32 % и различие в прочности этих материалов достигает 60%, это установлено экспериментально [59] и теоретически [129].

Особую опасность для тонкостенных цилиндрических оболочечных конструкций представляют дефекты в виде межслоевых расслоений [47, 49, 65, 89]. Существенное влияние на несущую способность конструкций из волокнистых ПКМ оказывает вид напряженного состояния в зоне дефекта, глубина залегания расслоения, его размеры и форма. Если дефект типа межслоевого расслоения располагается в плоскости действия растягивающих

напряжений, то заметного влияния на снижение несущей способности конструкции не обнаруживается [114].

Несплошности композиционных конструкций различают: по местоположению в элементе различают поверхностные, изолированные и выходящие на кромку детали; по происхождению, которые возникают на стадии формования и обработки, транспортировки, агрессивной среды хранения, эксплуатации; по раскрытию; по глубине залегания; по размерам структурных неоднородностей, распределенных в объеме материала или в его части, бывают микродефекты – размером до 60 - 100 мкм и макродефекты – размером свыше 60 - 100 мкм, которые не выходят обычно из объема материала детали. Например, макродефект – это воздушное включение по типу «раковина», которая имеет размер более 100 мкм, а микродефект - это пора, имеющая размер менее 100 мкм.

Все дефекты композиционных изделий, изготовленных намоткой, подразделяются на семь категорий (групп) по степени возникновения опасности [97].

В первую группу включены расслоения, связанные с малой степенью отверждения полимерно-композитной матрицы при низких температурах полимеризации и изменениями в составе материала соотношений используемых частей матрицы и связующего от нормированных показателей. Дефект приводит к изменению теплопроводности материала, связанный с неполным отверждением матрицы и резкому ухудшению эксплуатационных характеристик, способствующих снижению сопротивления материала к воздействию агрессивных сред и изменению поведения разрушения материала при динамическом и статическом нагружениях. На изменения характеристик устойчивости, прочности и эксплуатационной надежности влияет отклонение в составе соотношений матрицы и связующего в объеме материала. Данные изменения влияют в разной степени на вид деформирования материала (сжатие, растяжение, сдвиг) от характера напряженного состояния (одноосное, объемное, плоское), а также соответственно от цикличности и длительности нагружения.

Ко второй группе отнесены дефекты, которые влияют существенным образом на свойства материала, изменяя вид напряженного состояния. Прочность может не прогнозировано снижаться при растяжении материала с расслоением, завися от длины и глубины залегания расслоения, тогда как на прочность и модуль упругости при сжатии несплошности свойства материала в чистом виде практически не меняют.

В третью группу дефектов включены трещины. С появлением трещин нарушается целостность композита, создается высокая концентрация напряжений и подвергается агрессивному воздействию окружающей среды конструкция и отдельные ее части, которые могут привести к снижению работоспособности.

Четвертую группу образуют расслоения с зонами локального повышенного содержания матрицы, пор или волокна. Опасность этих дефектов зависит непосредственно от размеров, расположений и форм дефектов.

В пятую группу отнесены: подмятия, раковины, промежуточные складки, инородные включения. Инородные включения и подмятия приводят к появлению концентраторов напряженного состояния и влияют на изменение состава материала в сечении и на местное искривление волокон по дефекту. Влияние этих несплошностей на эластичность и прочность увеличивается с ростом степени армирования материала, поэтому такие дефекты оказывают влияние на большее количество слоев материала при более низком содержании связующего.

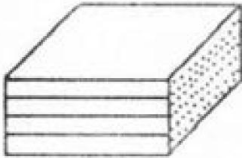
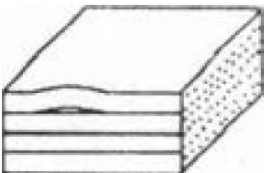
Шестую группу составляют надрезы, сколы и отверстия, снижающие несущую способность материала и влияющие на появление концентраторов напряжений. Анализ исследования дефектов принадлежащих данной группе показывает, что влияние концентраторов напряжений в виде отверстий снижает прочность КМ при увеличении скорости одноразового динамического и статического воздействия, а также по мере изменения продолжительности испытания при длительном нагружении.

Дефекты, включенные в седьмую группу, связаны с искривлением и перехлестыванием волокна в плоскости слоя, с несущественным отклонением угла армирования от выбранного значения. Отклонения угла армирования или

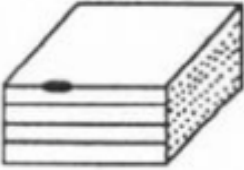
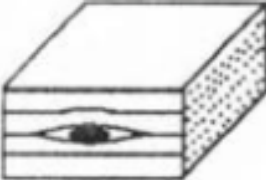
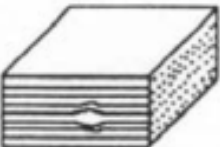
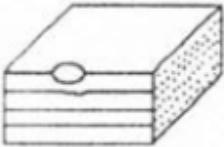
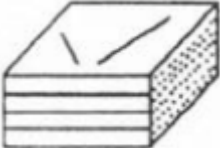
искривления в большинстве случаев не несут масштабного характера и, соответственно, имея размеры намного меньше размеров элемента конструкции, влияют только на один или несколько слоев композита.

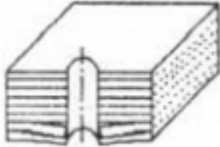

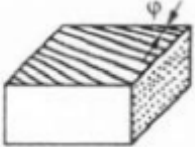
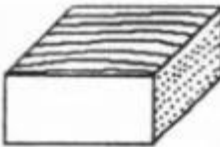
Схематичные виды дефектов в конструкциях и деталях из композита собраны в таблице 1.1, возникающие в процессе полимеризации, изготовления и эксплуатации, так же приведены причины их появления [4, 77].

Таблица 1.1 – Виды дефектов, возникающие в процессе производства

Группа по степени опасности	Вид дефекта	Схематичное изображение дефекта	Причины образования
1	Низкая степень отверждения связующего при формировании		<p>Отклонение от нормы количества компонентов в связующем.</p> <p>Несоблюдение температурного режима формирования.</p>
2	Расслоение	<p>а) замкнутое</p>  <p>б) с выходом на кромку детали</p>  <p>в) подповерхностное</p> 	<p>Попадание антиадгезионных веществ. Недостаточное содержание связующего, высокое содержание летучих элементов. Нарушение режима формирования: повышенная температура, высокая скорость охлаждения, ненормированное тепловое или механическое воздействие.</p> <p>Некачественное антиадгезионное покрытие на поверхности оснастки</p>

3	Трещины	<p>а) поверхностная</p>  <p>б) внутренняя</p>  <p>в) сквозная</p> 	<p>Нарушение режима формования: высокая скорость охлаждения. Превышение допустимых механических нагрузок при удалении оснастки, транспортировке, механической обработке. Ударные воздействия в процессе эксплуатации.</p>
4	Локальное несоответствие норме состава материала	<p>а) локальная зона с повышенным содержанием волокна</p>  <p>б) локальная зона с повышенным содержанием пор</p> 	<p>Неравномерное давление при формировании. Неравномерность прикатки.</p>

5	Инородные включения	<p>а) поверхностные</p>  <p>б) внутренние</p> 	<p>Попадание инородных материалов при намотке волокон.</p>
5	Раковина		<p>Повышенное содержание летучих элементов в связующем. Нарушения режима формирования: скорости нагрева, времени и величины приложения давления.</p>
5	Подмятие		<p>Дефекты на поверхности оснастки. Наличие посторонних включений на поверхности оснастки и вспомогательных материалов.</p>
5	Царапина		<p>Небрежность при удалении оснастки, при транспортировке, хранении и механообработке. Механические воздействия в процессе эксплуатации.</p>
6	Выкрашивание по кромкам отверстий и гнезд		<p>Неправильная заточка инструмента. Нарушение режима обработки.</p>

6	Отрыв поверхностных слоев		Неправильная заточка инструмента. Нарушение режима обработки.
6	Сколы		Небрежность при удалении оснастки, при транспортировке, хранении и механообработке. Механические воздействия в процессе эксплуатации.
7	Отклонение углов армирования		Ошибка при намотке. Деформирование при формировании.
7	Искривление волокон в плоскости слоев		Ошибка при намотке. Деформирование при формировании.

Чаще всего встречается дефекты второй, третьей и четвертой группы опасности.

К потере устойчивости и прочности при статической нагрузке в виде сжатия приводят усталостные разрушения структуры материала. Дефекты различного типа опасности по-разному влияют на ФМХ материала и чаще всего снижают прочность и упругость деталей конструкций из полимерных композиционных материалов [2, 100].

1.2 Анализ характеристик несплошности при изготовлении многослойных композиционных цилиндрических объектов

Необходимость проведения большого комплекса исследований, заключающихся в определении физико-механических свойств и их структурных особенностей, вызвало применение полимеров в высоконагруженных конструкциях. Требования по снижению материальных затрат на разработку и экспериментальную отработку, уменьшению времени и эффективного проектирования определили большой интерес к усовершенствованию и созданию методов исследования прочностных и деформационных свойств композитов, расчета НДС элементов и конструкций с применением численных моделей современных компьютерных пакетах [117].

Разработка прогнозирования и моделирования разрушений и прочностных свойств реальных материалов с дефектами является одной из важнейших задач механики материалов из композиционных полимеров. Эта задача требует достаточно сложных методов численного моделирования и описания процессов поведения элементов конструкций из ПКМ под нагрузкой, основывающихся на аналитические решения. Численно-аналитические методы, используемые в последнее время, имеют такую возможность.

Довольно сложной проблемой является исследование поведения упругопластических, анизотропных композитов, таких, как волокнистые однонаправленные или слоистые с неоднородными и однородными слоями [50, 108]. Теория многослойных анизотропных оболочек получила широкое применение для изучения поведения конструкций из слоистых тонкостенных КМ, так как большинство летательных аппаратов изготавливаются тонкостенными конструкциями и имеют слоистую структуру. Исследованиям в этом направлении, как показал обзор литературы посвящено сравнительно небольшое количество работ [3, 6, 10, 17, 131].

В сравнении с металлами композиционные материалы, обладая высокой удельной прочностью, устойчивостью и жесткостью, как описывалось ранее,

особенно восприимчивы к дефектам типа «отслоения». Отслоение является распространенным видом дефекта и при решении вопроса об использовании композитов в конструкции определяющим фактором часто считается появление и разрастание возможного расслоения. Отслоения возникают в районе скачкообразного изменения толщины материала или в местах концентрации напряжений из-за несовершенств технологии производства при изготовлении и воздействия эксплуатационных нагрузок. Локальное выпучивание отслоившегося слоя и потеря устойчивости с возникающим ростом зоны дефекта относится к одной из особенностей процесса расслоения. Элемент, имеющий в своей структуре дефект, может стать причиной общего разрушения конструкции при нагрузке меньшей предполагаемого, расчетного значения. Подобную задачу, учитывающую при решении взаимодействие механизма разрастания отслоения и локальной потери устойчивости, можно разделить на две локальные подзадачи: задачу разрушения и задачу упругопластической устойчивости. Первая решается с использованием методов теории упругости и механики разрушения, вторая – методами устойчивости цилиндрических тонкостенных конструкций.

В последнее время многие исследователи уделяли большое внимание проблеме устойчивости дефектов типа «отслоения» с последующим их увеличением. Это исследовательские работы, в которых определена предельная критическая нагрузка для случая локальной потери устойчивости расслоения [5, 37, 53, 70, 120]. Только полная ответная реакция отслоений на действующую нагрузку, приводящая к закритическим деформациям, которые появляются с ростом зоны дефекта, рассматривается в небольшом количестве работ [7, 12, 40, 64].

В статье [82] приведены результаты прочностного исследования конструкции сложной формы и представлен алгоритм решения контактной задачи теории упругости, который в дальнейшем использован для анализа ее напряженно-деформированного состояния. На одном из торцов имеется разрезная манжета из эластичного материала, края которой при действии эксплуатационных нагрузок могут вступать в контактное взаимодействие. Кроме этого, после

нахождения конструкции при отрицательных температурах в полимере было обнаружено расслоение в зоне торца с разрезной манжетой. В работе рассмотрено поведение данного расслоения в случае совместного действия температурной нагрузки и внутреннего давления. Показано, что с увеличением времени действия внутреннего давления наблюдается увеличение длины зоны расслоения и ее продвижение в сторону канала. Исследовано влияние модуля материала манжеты на уровень напряжений в зоне расслоения. Сделаны следующие выводы: на основе решения контактной задачи теории упругости и задачи механики разрушения исследовано поведение трещины (расслоение полимера) при росте давления в канале с течением времени, в вершине расслоения дефекта возникают действующие напряжения, вызывающие его рост в сторону канала, изменение модуля вставки оказывает не существенное влияния на величину напряжения в районе разрезной манжеты.

Целью исследований в работе [20] является оценка прочности данного фланца при квазистатических условиях нагружения с учетом возникновения и развития областей расслоения и исследуется влияние напряженно-деформированное состояния на прочность типичного композитного фланца кожуха авиадвигателя.

1.3 Расчетные модели оценки прочности материала и несущей способности конструкций из цилиндрических композиционных материалов с дефектами типа «межслоевые расслоения»

В связи с проблемой влияния технологических дефектов на прочность, жесткость и, в конечном итоге, на надежность многослойных конструкций из КМ возникают задачи двух классов [38]. К первому классу относятся задачи о росте дефектов под действием постоянных или переменных нагрузок и нахождение критических размеров дефектов, при которых этот рост происходит катастрофически быстро. Эти задачи относятся к области механики разрушения, и для их решения применяю методы данного раздела механики [135]. Ко второму

классу относятся задачи деформирования и устойчивости тонкостенных конструкций с дефектами заданных размеров. При этом предполагается, что размеры дефектов меньше их критических значений и они не растут. Эти задачи решают, применяя методы теории упругости [24].

Дефекты, либо являются следствием случайных разбросов параметров технологического процесса (включая и ошибки, вызванные «человеческим» фактором), либо являются систематическими, вызванными ошибками выбранной конструкторско-технологической схемы изготовления конструкции или спроектированной оснастки [87].

Таким образом, численное моделирование является еще пока достаточно дорогостоящим и продолжительным для широкомасштабных инженерных расчетов [92].

Для оценки влияния дефектов на НДС крупногабаритной многослойной конструкции можно применять подход, основанный на методах математического моделирования. В работе [43] представлен 3D расчет напряженно-деформированного состояния цилиндрической обечайки теплообменного аппарата, имеющей эллиптическую трещину. Было показано, что для существующей эллиптической трещины параметры силы и результирующая энергия разрушения изменяются нелинейно по всей передней части растущей трещины. В результате получено качественное и количественное соотношение параметров несущей способности трещины: J -интеграл учитывающий параметры по новообразованному фронту трещины с учетом ее размеров и формы разрастания фронта.

В статье [145] проводится численное исследование разрушения образцов из композиционного материала с расслоениями в квазистатической и усталостной постановках для изучения закономерностей развития расслоений в многослойных композиционных материалах при статической и динамической нагрузке. Метод конечных элементов для моделирования роста расслоения в реальной конструкции является наиболее подходящим инструментом ввиду сложности

геометрии и условий нагружения. Основываясь на контактном взаимодействии слоев-оболочек, используют модель когезионной зоны.

В [81] при исследовании НДС многослойных элементов ЖРД моделируется адгезионная прослойка с учетом физико-механического поведения на стыках металл – композит. Расчетные значения деформаций и температурных полей, полученных с учетом дополнительного слоя, ближе к значениям, полученным в эксперименте.

В работе [22] для отработки методики численного моделирования НДС с дефектом в виде расслоения дефект моделировался отсутствием контакта в заданной области.

Низкая сдвиговая жесткость слоев пакета в поперечном направлении требует применения при расчете уточненных теорий. Оценка НДС таких систем является сложной задачей, и на практике не всегда удается получить их решение в замкнутой форме. Соответственно возникает необходимость в разработке численного моделирования на основе уточненной теории, позволяющей определить и исследовать компоненты НДС слоев пакета в автоматизированном режиме. Численное моделирование и анализ НДС проводится на основе одного варианта уточненной теории слоистых пластин, в которых учитывают поперечный сдвиг, асимметрию структуры, давление слоев друг на друга, деформации нормали, ортотропию слоев[73].

Двумерная модель элементов конструкций с допустимыми дефектами типа отслоений из слоистых композиционных и традиционных материалов разработана в работе [39]. При определении критической нагрузки получают аналитические выражения отклонений в начальной фазе сверхкритической деформации. Исследуется природа возможных форм и видов равновесия.

Для оценки влияния несплошностей многослойной конструкции на НДС можно применять подход, основанный на методах математического моделирования. Исследования, проведенные по методике численного расчета НДС многослойной крупногабаритной цилиндрической конструкции из разнородных материалов, разработанной ПНИПУ для НПО Искра, позволяют

прогнозировать влияние дефекта в виде расслоения и статическую прочность конструкции.

Выводы по главе 1

1. Анализ литературных источников показал, что авторами предложена классификация различных типов дефектов, возникающих в результате изготовления и эксплуатации композитных конструкций, указаны причины их возникновения. Отслоение является наиболее распространенным и опасным видом дефекта для тонкостенных оболочек вращения летательных аппаратов, и при определённых условиях может быть причиной разрушения конструкции.

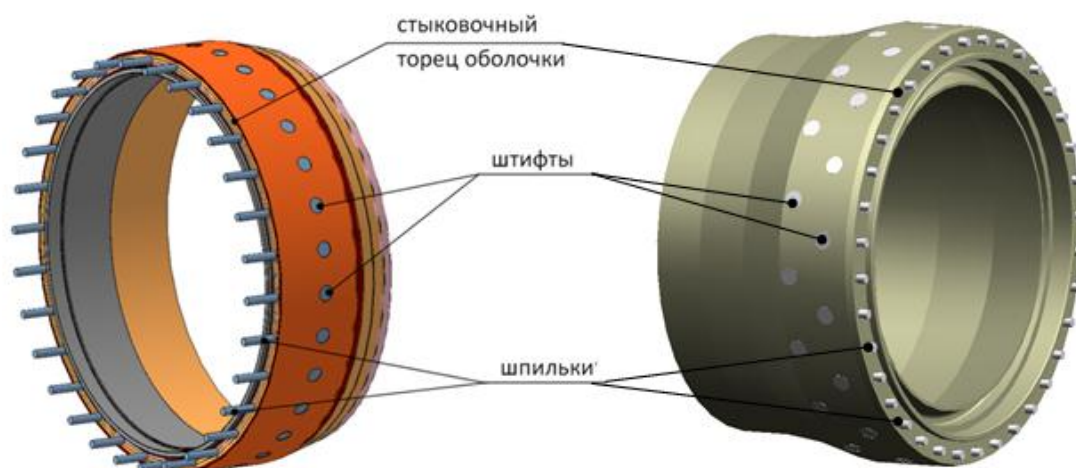
2. Анализ литературных источников показал также отсутствие методик, эффективно регламентирующих этапы проектирования и сертификации создаваемых композитных структур в составе композитных конструкций. Не доведены до совершенства методы и средства диагностики технического состояния изготовленной композитной конструкции, не отработаны вопросы оценки прогнозирования прочностных свойств конструкции на основе экспериментальных данных по уровню имеющихся в конструкции несплошностей.

3. Создание методики диагностики технического состояния корпусов РДТТ, имеющих частичное расслоение узлов стыка, является актуальной задачей и требует использования современного трёхмерного анализа напряженно-деформированного состояния композитной конструкции, составленной из разнородных композиционных структур.

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕСПЛОШНОСТИ КОМПОЗИТА НА ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ

В настоящее время широко применяют полимера-композиционные материалы для производства тонкостенных оболочечных конструкций в космической технике, к которым определяются особые требования по эксплуатационным характеристикам, жесткости и прочности. В КМ могут возникать различного рода дефекты, связанные с нарушением целостности и однородности. Особую опасность для тонкостенных цилиндрических оболочечных конструкций, работающих под давлением и на растяжение, предоставляют дефекты в виде межслоевых расслоений. Эти дефекты вызваны особенностями механических характеристик материала и технологических процессов. Они возникают вследствие низкого сопротивления слоистых композитов, как на стадии производства изделия, так и в процессе его хранения и эксплуатации, поперечному отрыву и межслоевому сдвигу. Разработка методов расчета, в связи с этим, является актуальной проблемой, позволяющая учесть и оценить влияние таких дефектов на НДС, а также дать обоснования требований к нормам дефектности.

Появление несплошностей, подчиняющимся своим закономерностям, очевидно, следует отнести к стохастическим явлениям, знание которых необходимо для получения количественных оценок расслоений композиционного материала и последующего учета при оценке НДС дефектного корпуса. Для этих целей был проведен статистический анализ дефектности изготовленных отверстий под штифто-шпилечное соединение на заднем и переднем узлах стыка (рисунок 2.1).



а) передний узел стыка

б) задний узел стыка

Рисунок 2.1 – Узлы стыка

Для исследования имеющихся несплошностей проанализированы результаты сопроводительных паспортов изготовленных изделий. С учетом результатов ультразвуковой дефектоскопии проанализированы площади расслоений на заднем и переднем узлах стыка.

Изучая данные паспортов изготовленных изделий, выявлено, что 60 % корпусов имеют 600 – 900 см² площадь расслоений в переднем узле стыка. На заднем узле стыка у 58 % корпусов площадь появившихся расслоений не превысила 50 см².

Можно сделать вывод, анализируя полученные данные для конструкций узлов стыков, о необходимости изучения влияния возникающих несплошностей в области штифто-шпилечного соединения на работоспособность корпуса.

Следовательно, технологические напряжения в элементах появляются на стадии изготовления в результате действия внешних сил, физических и химических процессов таких, которые не одновременно протекают в материале и, как правило, приводят к увеличению или уменьшению объема. В конструкции возникают остаточные напряжения после проведения химических и физических воздействий, которые действуют на протяжении всего срока эксплуатации, ухудшая или улучшая эксплуатационные свойства конструкции.

Согласно [90] дефекты, такие как отслоение и вырыв волокна, возникают при сверлении деталей, механической обработке отверстий из ПКМ. Потенциальные возможности спроектированной материальной структуры противодействовать усталостным напряжениям резко снижаются из-за полученных дефектов, что приводит к увеличению вероятности появления отказа оборудования и к снижению ресурса конструкции в процессе эксплуатации.

Очевидно, что происходит перераспределение остаточных напряжений при вскрытии отверстий под штифты и шпильки в первом ряду, поэтому при изготовлении отверстий второго ряда дефекты не разрастаются на заднем стыке.

Требуется решения вопросов ограничений, регламентации возникающих дефектов в связи с объективным существованием расслоений при действующей технологии изготовления тонкостенных высоконагруженных элементов конструкций летательных аппаратов из композитного материала. Для решения поставленной задачи необходимо проанализировать влияние полученных размеров и местоположения возникшего локального расслоения на его напряженно-деформированное состояние (НДС) при существующих условиях нагружения по всей площади конструкции [40, 41, 42, 53, 126, 128].

2.1 Объект исследований

Были изготовлены кольцевые образцы с расслоениями для экспериментального изучения взаимовлияния расслоения на физико-механические характеристики (рисунок 2.2).

Для проведения испытаний изготавливались образцы диаметром 150 мм, шириной 12 мм и толщиной из 6 слоев 1,2 мм на эпоксидном связующем из одной бобины органожгута (органоволокно Русар-С 600 А и связующее УП-2217). Намоткой на металлическую оправку производилось изготовление кольцевых образцов. С помощью фторопластовой пленки в процесс намотки образцов вводились искусственные дефекты, моделирующие расслоения между слоями. На рисунке 2.2 приведены схемы расположения фторопластовой пленки и размеры

образцов. Исходя из анализа, встречающихся расслоений в цилиндрических оболочках, выбирались схемы расположения расслоения (фторопласта) в образце. Образцы имели ровную поверхность, гладкую, без вздутий, сколов и неровностей.

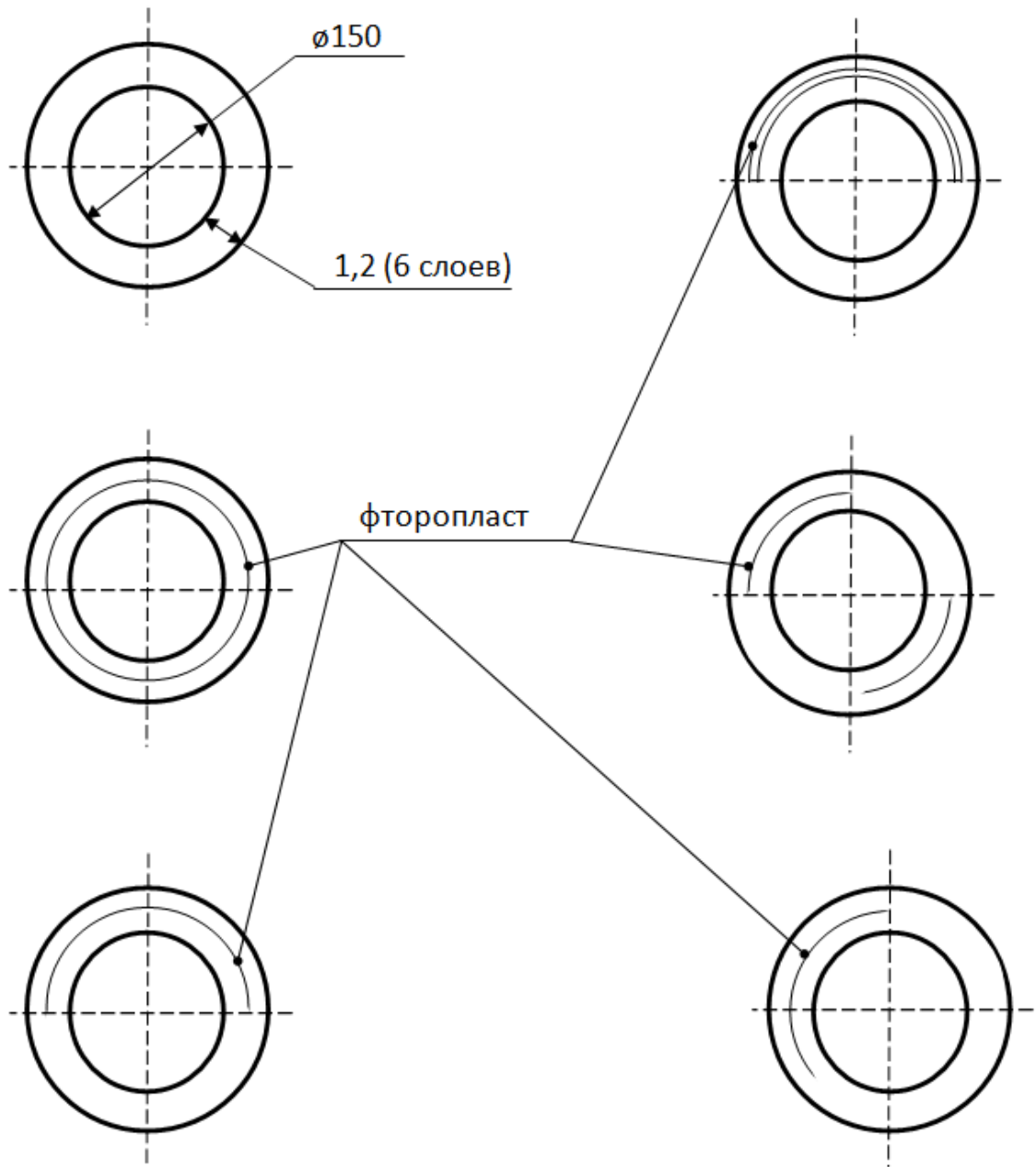


Рисунок 2.2 – Схемы образцов с расслоениями

2.2 Экспериментальное оборудование и экспериментальный план проведения исследований

Исследование проводилось в соответствии с ГОСТ 25.603-82. Стандарт, использованный при проведении испытания, распространяется на полимерные композиционные материалы изготовленные методом намотки и устанавливает этапы испытания на растяжение кольцевых образцов.

Метод заключается в кратковременном растягивающем нагружении кольцевых композиционных образцов металлическими полудисками (рисунок 2.3).

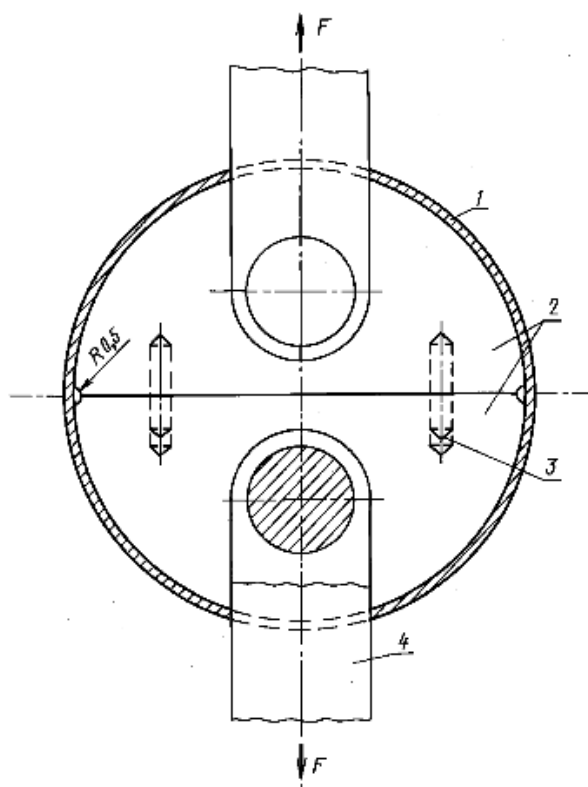


Рисунок 2.3 – Схема нагружения образцов
(1 – образец; 2 – полудиски; 3 – направляющая; 4 – тяга)

Образцы испытывались на разрывной машине, обеспечивающей соответствие требований ГОСТа постоянную скорость 10 мм/мин перемещения полудисков и измерения с погрешностью не более 1 %.

При проведении запланированного опыта на растяжение определяли разрушающие напряжения кольцевых образцов. Направление приложенной

растягивающей нагрузки было перпендикулярно к плоскости разреза полудисков, и проходило через центр кольцевого образца.

Во время испытаний велась непрерывная запись значений перемещений полудисков, текущей нагрузки и времени. По полученным данным строились диаграммы деформирования в окружном направлении – это зависимость окружного напряжения σ , от деформации ε , и вычислялся модуль упругости E и предел прочности $\sigma_{пр}$ кольцевого образца. Схемы нагружения в испытательной машине образцов с внедренным фторопластом представлены на рисунке 2.4.

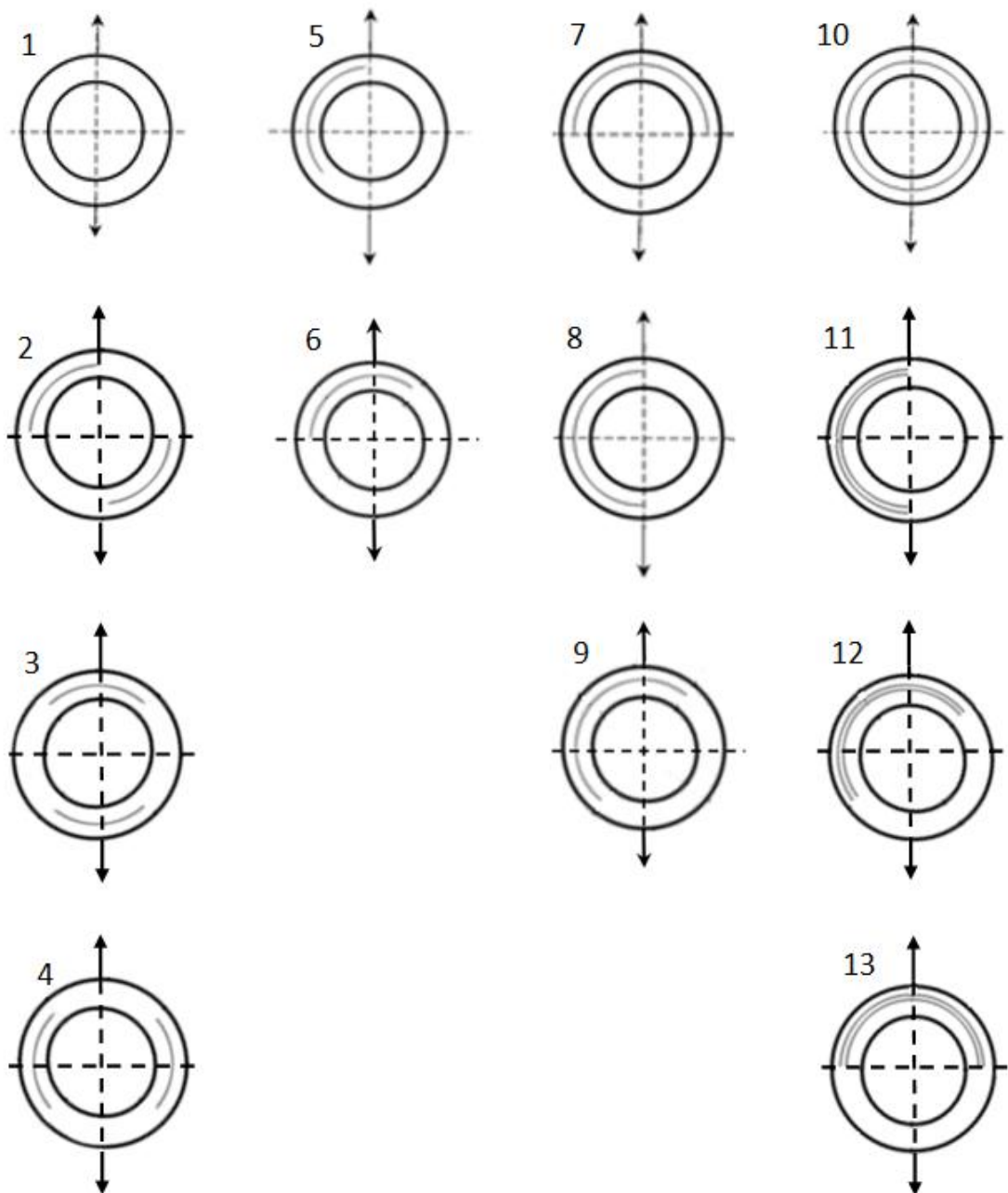


Рисунок 2.4 – Схемы положения образцов в испытательной машине

2.3 Результаты определения прочности кольцевых образцов из КМ с межслойным расслоением

Напряжение в окружном направлении вычисляли по формуле

$$\sigma = \frac{F}{2 \cdot S}, \quad (2.1)$$

где F – нагрузка, приложенная к захвату при испытании, Н;

S – площадь поперечного сечения образца в плоскости смякания полудисков, мм².

Модуль упругости при испытании в окружном направлении определяли по формуле

$$E = \frac{\Delta \sigma_0}{\Delta \varepsilon} = \frac{\Delta F}{2 \cdot S \cdot \Delta \varepsilon}, \quad (2.2)$$

где ΔF – разница приложенной нагрузки;

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.3)$$

$\Delta \varepsilon$ – приращение относительной деформации во время испытания при изменении нагрузки;

l – первоначальная длина измерительной базы;

Δl – изменение длины измерительной базы при приращении нагрузки на ΔF .

Предел прочности $\sigma_{пр}$ при испытании определяли по формуле

$$\sigma_{пр} = \frac{F_{пр}}{2S}, \quad (2.4)$$

где $F_{пр}$ – разрушающая нагрузка.

Предполагалось, что зона расслоения оказывает наибольшее влияние на уменьшение разрушающей нагрузки. В Приложении А приведены диаграммы записи текущей нагрузки, перемещений полудисков и времени. По приведенным диаграммам определены зависимости окружного напряжения σ от окружной деформации ε (рисунок 2.6) и прочностные ФМХ кольцевых образцов (таблица 2.1) с доверительной вероятностью 0,999.

Таблица 2.1 – ФМХ материала образцов

№ образца	σ_b – предел прочности, МПа		E – модуль упругости, ГПа	
	Математическое ожидание	Доверительный интервал	Математическое ожидание	Доверительный интервал
1	2778	2737 ÷ 2819	118,0	107,9 ÷ 128,2
2	2579	2541 ÷ 2618	114,8	104,9 ÷ 124,5
3	2365	2326 ÷ 2405	118,4	108,5 ÷ 128,5
4	2379	2345 ÷ 2415	132,3	121,5 ÷ 143,1
5	2715	2672 ÷ 2759	110,1	100,2 ÷ 119,9
6	2660	2615 ÷ 2707	129,8	119,3 ÷ 140,5
7	2769	2728 ÷ 2809	112,4	102,5 ÷ 122,4
8	2699	2629 ÷ 2709	128,2	117,5 ÷ 138,8
9	2632	2588 ÷ 2677	132,3	121,5 ÷ 143,1
10	2579	2556 ÷ 2638	114,8	104,7 ÷ 124,7
11	2805	2760 ÷ 2849	128,5	118,1 ÷ 138,9
12	2365	2325 ÷ 2405	133,5	122,7 ÷ 144,4
13	2836	2793 ÷ 2880	117,3	107,8 ÷ 127,6

Разрушение образцов сопровождалось характерным щелчком и расслоениями по всему образцу. Вид разрушения образца приведен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Вид разрушенного кольцевого образца.

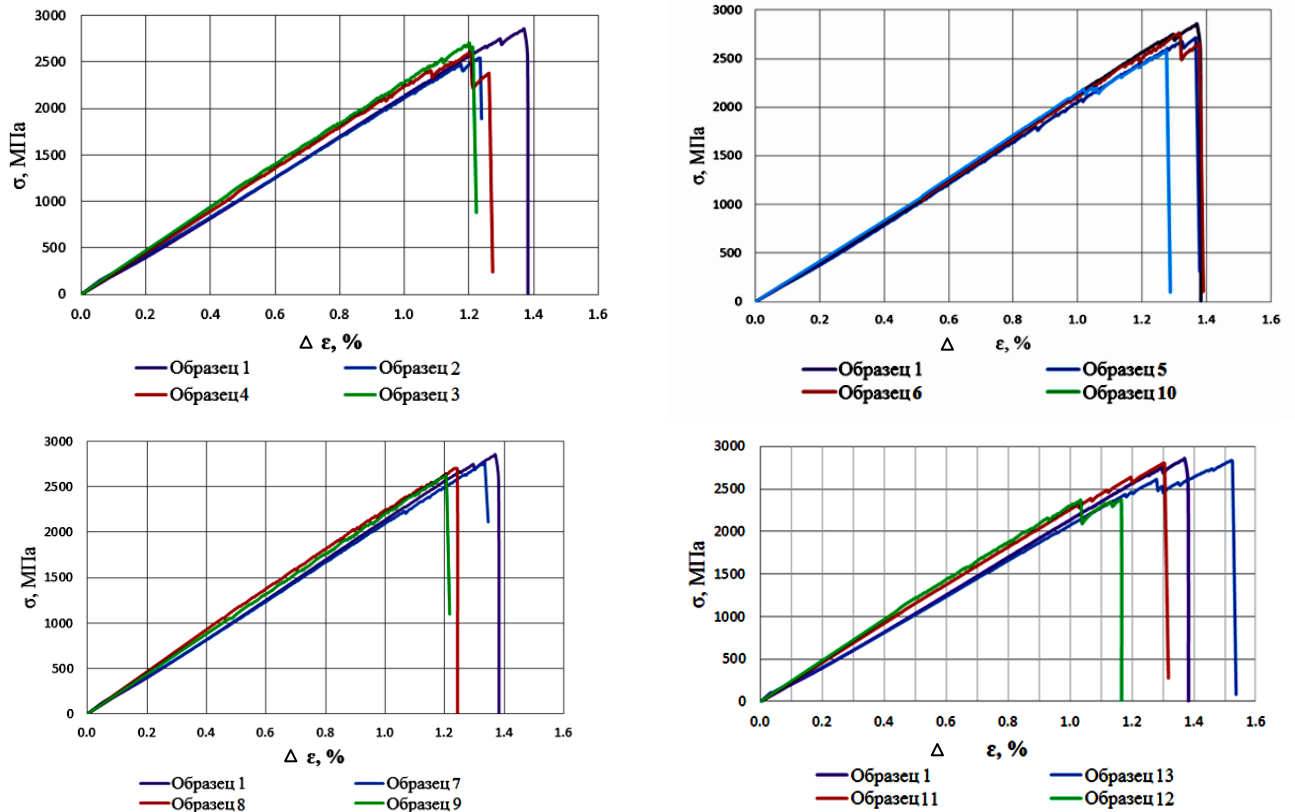


Рисунок 2.6 – Диаграммы растяжения образцов

Как показывают результаты испытаний образцов предел прочности материала при различных видах расслоений снижается. Уровень снижения предела прочности для различных расположений расслоения, приведённых на рисунке 2.6, составляет;

- от 11 до 17 % для схемы 3, 4, 2 (расслоение двух противоположных секторов окружности образца);
- от 3 до 10 % для схемы 10 (расслоение по всему образцу);
- от 3 до 8 % для схемы 9, 8, 7 (расслоение в половину окружности кольцевого образца);
- от 1 до 17 % для схемы 13, 12, 11 (двойное расслоение на половине окружности образца);
- от 5 до 17 % для схемы 5, 6 (расслоение на третью часть окружности).

Наибольшее снижение предела прочности кольцевого образца зафиксировано при воздействии нагрузки под углом 45^0 относительно периферии несплошности.

По результатам проведенных испытаний на растяжение образцов из органоволокна (таблица 2.1) можно сделать следующие выводы;

1. Подтвердили отрицательное влияние на прочностные и деформационные характеристики композитного образца с дефектом.

2. При приложении нагрузки под углом 45^0 относительно периферии расслоения получено наибольшее снижение предела прочности материала.

3. До 17 % снижается предел прочности для различных площадей несплошности и расположений расслоения.

2.4 Коэффициент несплошности

Для описания расслоений введен безразмерный коэффициент несплошности k , который выражается в следующем

$$k = \frac{S_{\text{расслоен}}}{S_{\text{общ}} \cdot n}, \quad (2.5)$$

где $S_{\text{расслоен}}$ – площадь возникшего расслоения;

$S_{\text{общ}}$ – площадь поверхности изготовленного образца;

n – количество намотанных слоев в образце.

В таблице 2.2 приведен коэффициент несплошности для исследуемых образцов.

Таблица 2.2 – Зависимость коэффициента несплошности от расслоения

Вид расслоения	$S_{\text{общ}}, \text{мм}^2$	$S_{\text{расслоен}}, \text{мм}^2$	n	k
сплошное	5652	5652	6	0,17
1/2 слоя	5652	2832	6	0,08
1/3 слоя	5652	1884	6	0,06

Пример расчета коэффициента несплошности

Корпус изготовлен с отступлением: расслоения на переднем и заднем узлах стыка. Диаграмма расслоений на переднем и заднем узлах стыка приведена на рисунке 2.7.

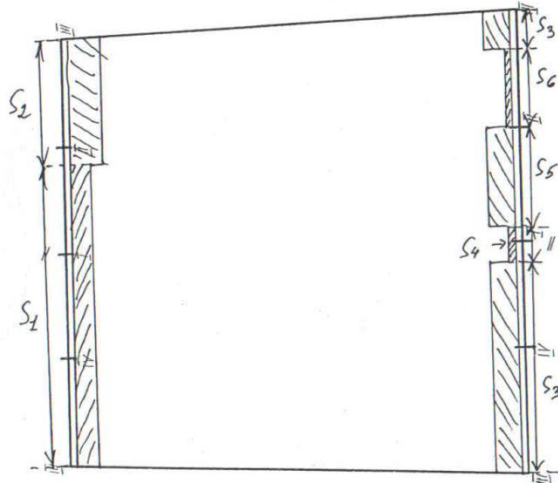


Рисунок 2.7 – Схема расположения несплошностей на переднем и заднем узлах стыка

Размеры расслоений приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Размеры расслоений, см

№	а, см	в, см	s, см ²
1	6	72	432
2	8	28	224
3	7	68	476
4	2	11	22
5	7	25	175
6	2	16	32

Коэффициент несплошности для переднего и заднего узлов стыка изготовленной цилиндрической конструкции рассчитывается по формуле (2.5).

$$k = \frac{S_{\text{расслоен}}}{S_{\text{общ}} \cdot n},$$

где $S_{\text{расслоен}}$ – суммарная площадь несплошностей на переднем и заднем узлах стыка;

$S_{\text{общ}}$ – площадь срединной поверхности на максимальной глубине (параметр a – таблица 2.3) расслоения.

Исходные данные и результаты расчета коэффициентов несплошности переднего и заднего узлов стыка приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Исходные данные и коэффициенты несплошности

Величина	ПУС	ЗУС
Площадь поверхности расслоения $S_{\text{расслоен}}, \text{мм}^2$	65600	70500
Площадь срединной поверхности $S_{\text{общ}}, \text{мм}^2$	$\pi \cdot 314 \cdot 80 =$ 78877	$\pi \cdot 382 \cdot 70 =$ 83964
Количество слоев в образце n , шт	79	79
Коэффициент несплошности, k	0,0105	0,0106

Выводы по главе 2

1. На основании проведенного анализа несплошностей в изготовленных корпусах определены площади распределения несплошностей для заднего и переднего узлов стыка, дающие исходную информацию для постановки задачи математического моделирования прочностного состояния корпуса двигателя и оценки статической прочности на основе анализа НДС композитных конструкций с учетом несплошностей.

2. С целью исследования влияния расслоений между слоями на деформационные и прочностные свойства КМ изготовлены кольцевые образцы с фторопластовой пленкой, имитирующей расслоения, и по стандартной методике проведены испытания этих образцов, которые подтвердили отрицательное влияние расслоений, наибольшее снижение предела прочности материала

получено до 17 % (при приложении нагрузки под углом 45° относительно периферии расслоения).

3. Для характеристики уровня имеющихся расслоений в конструкции и в испытываемых образцах введен безразмерный коэффициент несплошности k .

3 ВЛИЯНИЕ РАССЛОЕНИЙ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ

В настоящей главе рассмотрен ряд задач расчета НДС металлокомпозитных соединений в виде штифто-шпилечного соединения (ШШС), используемых для соединения композитного корпуса с металлическими частями конструкции и резьбового соединения в корпусе КМ с учётом дефектов в виде расслоения.

Рассмотрено влияние несплошности стыков многослойного корпуса РДТТ, состоящего из разнородных композиционных материалов, на прочностной ресурс конструкции.

3.1 Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и оценка прочности цилиндрической оболочки из разнородных композиционных материалов

Интенсивное использование математических моделей механического поведения деталей и узлов из композиционных материалов предполагает современный подход к созданию конструкций из композитных материалов. Для различных вариантов эксплуатационных нагрузок действующих на детали из ПКМ, характерна вполне определённая схема армирования, являющаяся оптимальной и позволяющая наиболее полно реализовать механические свойства композита в конструкции [8, 44, 58, 86, 102]. Наличие в конструкциях разнородных материалов, отличающихся жесткостью и объемным расширением в процессе различных технологических температурных режимов, неизбежно способствует возникновению напряженно-деформированного состояния, приводящего к неравновесному физическому состоянию, вследствие чего имеют место краевые эффекты в виде отслоений (металл-клей-резина), а также зональные и единичные расслоения между материалами в наиболее деформативных участках. Эти явления имеют особо важное значение для проектирования на основе расчетов НДС. Известно, что композиционные волокнистые материалы относятся к анизотропным, и в отдельных направлениях

имеют низкие прочностные свойства. Например, межслоевая прочность на сдвиг у титановых сплавов она достигает 500 МПа и более, тогда как у слоистых углепластиков менее 30 МПа. При проектировании композитных и металлокомпозитных конструкций необходимо детально прогнозировать их напряженное состояние и работоспособность конструкций, что при современном развитии науки и техники достигается с помощью численных моделей НДС.

Из однонаправленных ровингов методом намотки с применением полимерных связующих изготавливаются цилиндрические оболочки с различным соотношением длины к диаметру, а также конические оболочки. Метод намотки широко используется для изготовления баллонов давления. В стенке конструкции формируется, в результате, слоистая структура композиционного материала [78, 102, 121, 122]. Слоистые полимерные композиционные материалы обладают высокими характеристиками в плоскости армирования. Однако анизотропия физико-механических свойств, приводит к низкой межслоевой прочности [21, 115, 120], зависящей от принятой схемы армирования. Проектирование и создание композитных конструкций методом намотки является многопараметрической задачей, требующей учёта совокупности нагрузок, действующих на конструкцию, особенностей структуры и свойств композиционных материалов, а также условия равнопрочности. При создании металлокомпозитных конструкций появляются дополнительные задачи обеспечения прочности в узлах стыка, соединений различных поверхностей при формировании стенок сложной геометрии и участков технологических переходов [51, 58, 98, 114, 137].

В слоистых конструкциях материалы с особыми свойствами, такими как повышенная износостойкость, твердость, высокая прочность на сдвиг и шероховатость, эффективно используются в композитных соединениях со встроенными металлическими элементами. Внедрение материалов, имеющих отличные от композита свойства, может привести к появлению концентраторов напряжений [74, 125, 137].

В связи с указанными особенностями композитных и металлокомпозитных конструкций особую значимость приобретают расчеты, связанные с анализом напряженно-деформированного состояния и оценкой запасов прочности при действии эксплуатационных и стендовых испытательных нагрузках. На современном этапе для предлагаемой оценки широко используются математические модели, которые, учитывают особенности механического поведения слоистого композиционного анизотропного материала в составной многозонной конструкции. Определяющая роль при таком подходе отводится численным моделям, описывающим совместную работу полимерных композиционных материалов и закладных элементов из металла, входящих в состав изделия и выполняющих функцию соединительных узлов.

Важно отметить, что внедрение металлических закладных элементов в технологический процесс формования композитных конструкций приводит к появлению напряжений технологического характера, вследствие различного уровня деформирования слоев при охлаждении и нагреве и существенного различия физико-механических свойств во время стеклования и полимеризации композиционного материала [23, 29, 35, 116]. После формования закладных элементов в композитной конструкции чаще всего требуется последующая механическая обработка созданной металлокомпозитной конструкции – сверление отверстий и/или создание дополнительного клеевого соединения и токарная обточка посадочных мест металлических деталей и др. [28, 44]. Механическая обработка в этих зонах неизбежно приводит к повреждению связующего и появлению микротрещин в слоистой структуре композиционного материала [90]. Вследствие различных температурных деформаций металлического закладного элемента и композиционного материала появляются технологические напряжения в клеевом шве, полимеризация которого, как правило, происходит при повышенной температуре. Таким образом, указанные технологические операции могут привести к возникновению расслоений в композитной конструкции еще до начала её эксплуатации [23, 29].

Задача разработки и совершенствования математических моделей, учитывающих особенности напряженно-деформированного состояния в узлах соединений, и их верификация в ходе последующих исследований является актуальной задачей. В этом разделе разработана численная математическая модель для расчета НДС цилиндрической оболочки, выполненной намоткой однонаправленным ровингом со штифто-шпилечным соединением и металлическими закладными элементами.

При разработке математической модели задача состоит в построении двухуровневой модели, позволяющей рассчитать все компоненты тензора напряжения в слоях в зоне соединения композитной оболочки с металлическими закладными элементами. Напряженно-деформированное состояние усредняется по толщине конструкции и оболочки в целом.

Объектом исследования является слабо коническая сегментированная цилиндрическая оболочка, имеющая угол уклона образующей менее 1 градуса. Конструкция, содержащая закладные металлические элементы, приведена на рисунке 3.1. Узел стыка представляет собой систему двойных переплетенных спиральных и кольцевых слоев, изготовленных по методу намотки однонаправленного ровинга. Предусмотрено армирование узла стыка дополнительными слоями текстильного наполнителя. В узлах стыка присутствуют также элементы штифто-шпилечного соединения (ШШС).

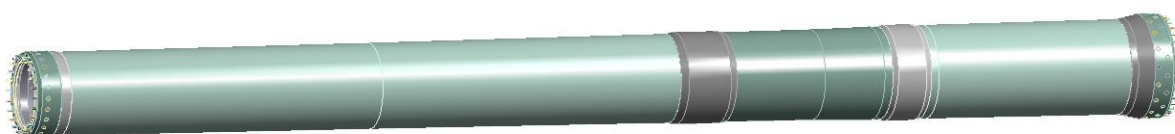


Рисунок 3.1 – Общий вид исследуемой конструкции

Во время испытания оболочка подвергается воздействию внутреннего давления. В этом случае на соединение штифт-шпилька воздействует осевая сила из-за давления на торцевые крышки. На этапе проведения испытания желательно получать информацию как об общем характере деформирования композитной оболочки, так и особенностях полей деформаций и напряжений в окрестности

ШШС. Такой подход повышает достоверность создаваемой методики расчета НДС и оценки запасов прочности.

В работе [114] исследовалось влияние расслоений на прочность ШШС. Рассматривался участок ШШС в сегменте корпуса с расслоением (30 мм и 50 мм) (рисунок 3.2), нагруженный равномерно распределенной растягивающей нагрузкой. На основании исследования было найдено распределение напряжений по слоям в сегменте и установлено, что расслоение не снижает несущей способности и прочности оболочки и ШШС.

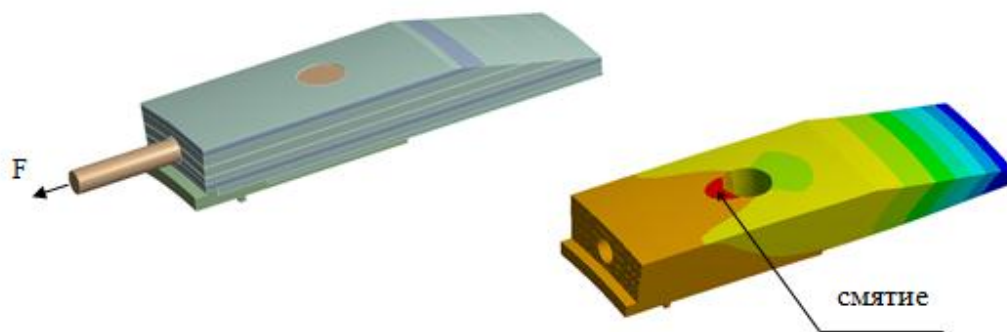


Рисунок 3.2 – Расчетная схема

Была обнаружена существенно неравномерная деформация элементов стыка, а именно: деформации композитной оболочки существенно превышает деформации закладных элементов. Это приводит к появлению сдвиговых и изгибающих напряжений в окрестности контакта оболочки корпуса с закладными элементами, а также смятию отверстий ШШС [114].

Расчет НДС композитной цилиндрической оболочки с закладными элементами из металла связан с определением полей напряжений в армирующих слоях и оценкой межслоевых напряжений в контактной зоне и последующим анализом общего характера деформирования композитной оболочки. Прочность армирующих слоев на расслоение в зонах контакта можно оценить по межслоевым напряжениям, а прочность на разрыв – по напряжениям в армирующих слоях.

Поставленная задача решается в два этапа. Первый этап состоит в расчете НДС конструкции с определёнными эффективными характеристиками из однородного анизотропного материала в трехмерной постановке.

На втором этапе решается трехмерная задача теории упругости для анизотропного неоднородного сегмента, «вырезанного» из конструкции. Отрезанный сегмент нагружается по контуру с помощью нагрузки или перемещения, полученной в результате решения первой задачи (взамен «отброшенной части»). На этом этапе можно оценить прочность сегмента на расслоение и получить полное поле межслойных напряжений и деформаций в слоях.

Для удобства проведения многопараметрического исследования и сокращения времени решения поставленной задачи была разработана параметрическая модель конструкции, позволяющая варьировать схему армирования (количество слоев, углы намотки, материал и геометрические параметры, основанные на геометрической модели, разработанной в инженерном пакете). На рисунке 3.3 показана геометрическая модель, в которой выделены девять сегментов – зон, отличающихся углами армирования и количеством слоев. Характерные пакеты слоев для различных зон конструкции изображены на рисунке 3.4. Для решения задачи на первом этапе использовалась разработанная модель. Для решения задачи второго уровня на втором этапе была построена модель сегмента заднего и переднего узлов стыка оболочки (рисунок 3.4) с элементами ШШС и металлическим закладным элементом. На переднем узле стыка штифты расположены в один ряд, а на заднем узле стыка - в два ряда в шахматном порядке, что учитывалось в моделях при разработке.

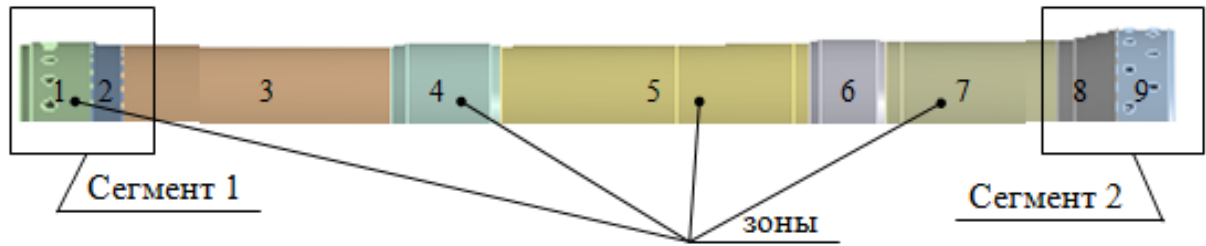


Рисунок 3.3 – Часть 3D-модели многослойной конструкции

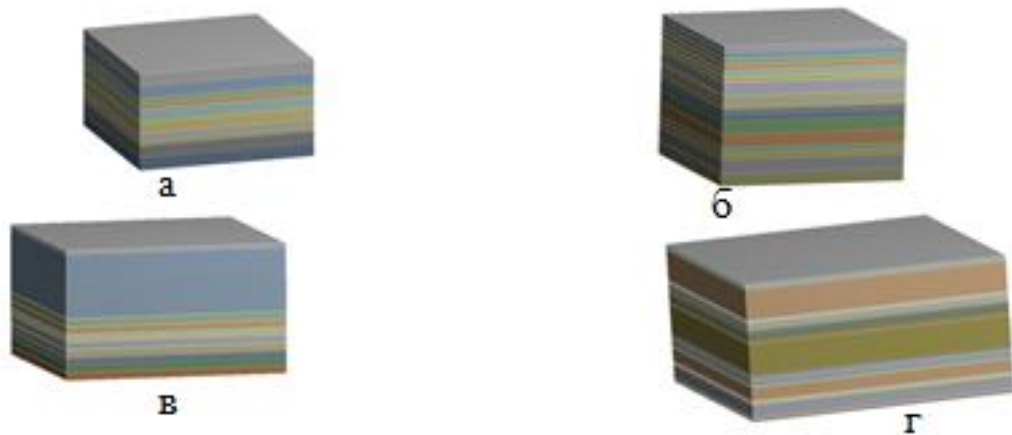


Рисунок 3.4 – Многослойные пакеты с разными углами укладки спиральных слоев и различным количеством кольцевых, спиральных и тканевых слоев.

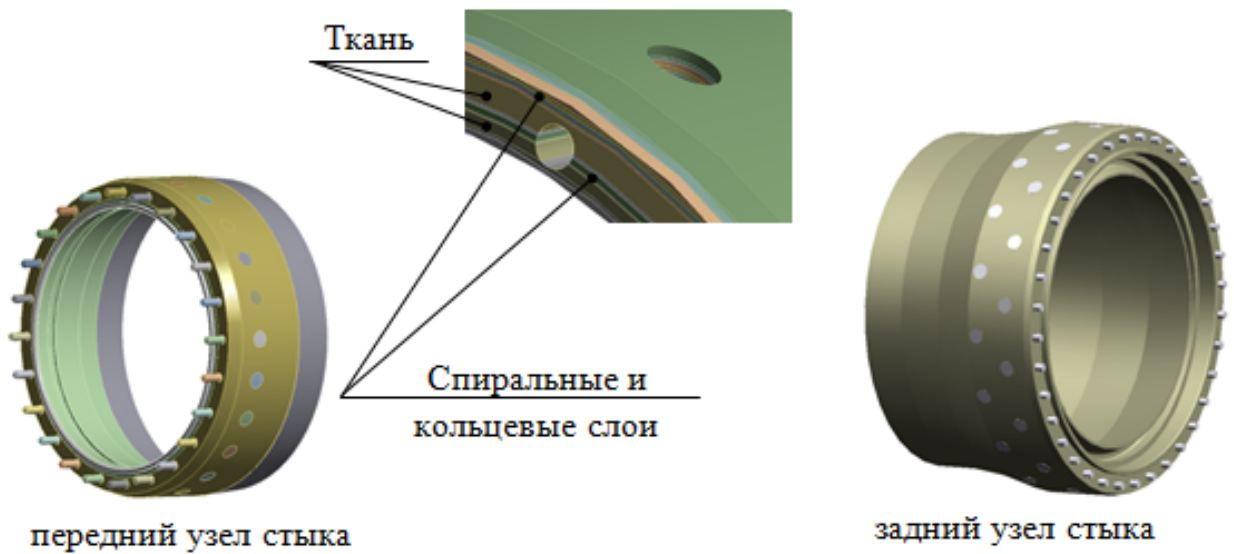


Рисунок 3.5 – Модель сегмента

При решении задачи второго этапа в модель сегмента закладывалась геометрия закладных элементов, штифтов и шпилек и схема армирования слоев. Смещения, полученные из решения задачи первого этапа задавались на расстоянии равным 120 мм от края закладного элемента до плоскости усеченной части конструкции. Зона концентрации полей деформаций и напряжений вследствие краевого эффекта составляет 15 мм, как показали последующие расчеты, обусловлена характером приложения перемещений на границе с «отброшенной» частью к исследуемому сегменту конструкции. Принятый размер сегмента конструкции в исследуемой зоне ШШС, таким образом, позволяет минимизировать влияние краевого эффекта на НДС.

Расчет НДС многослойной конструкции из композиционных материалов ставился в вариационной постановке и состоит в отыскании с дополнительными условиями минимума функционала Лагранжа [14]. Материал конструкции – неоднородный анизотропный. Вариация функционала при исключении массовых сил имеет вид:

$$\delta J_u = \int_V \varepsilon_{ij} C_{ijkl} \delta \varepsilon_{kl} dV - \int_{S_t} F_1 \cdot \delta u_i dS \quad (3.1)$$

где ε_{ij} и $\delta \varepsilon_{ij}$ – тензор и вариация тензора деформаций;

C_{ijkl} – тензор упругих модулей;

δu_i – вариация вектора перемещений;

F_1 – вектор внешних сил.

Для функционала Лагранжа (3.3) в качестве дополнительных условий включаются геометрические уравнения Коши:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.2)$$

Многосвязная область V конструкции состоит из подобластей $V^{(p)}$, соответствующих различным материалам (p) и имеет внешнюю границу $S = S_u + S_t$, на которой задаются кинематические и силовые граничные условия.

Действие сил, распределенных по внутренней поверхности цилиндрической части, описывается граничными условиями

$$\sigma_{ij,j} n_j|_S = P_i \quad (3.3)$$

где S – область, нагруженная внутренним давлением;

σ_{ij} – тензор напряжений в точках поверхности.

В местах крепления штифтовых отверстий задавались кинематические граничные условия:

$$U_i|_S = U_i^0 \quad (3.4)$$

где U_i – проекции вектора перемещений $\vec{U}(X_1, X_2, X_3)$ в точках поверхности тела;

U_i^0 – функции, заданные на поверхности тела.

Граничные условия на границе контакта двух взаимодействующих тел (слоев композита) f_k и f_{k+1} зависят от типа контакта и определяются следующими условиями:

1) связанный контакт типа *Bonded*

$$U_i^{f_k}|_S = U_i^{f_{k+1}}|_S \quad (3.5)$$

2) скользящий контакт без трения типа *Frictionless*

$$P_i \cdot n_i|_S = 0, U_i > 0 \quad (3.6)$$

3) контакт с трением типа *Frictional*

$$\begin{aligned} P_i \cdot n_i|_S &= 0, U_i > 0 \\ U_i^{f_k}|_S &= U_i^{f_{k+1}}|_S, \sigma_{\text{ЭКВ}}^{f_k}|_S \leq \mu \sigma_{\text{ЭКВ}}^{f_{k+1}}|_S \end{aligned} \quad (3.7)$$

где $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{f_k}$ – эквивалентные напряжения;

μ – коэффициент трения.

Сегменты – это зоны с разными схемами армирования конструкции соответствуют в модели первого уровня подобластям, слои с межслойными границами S_d - в модели второго уровня.

Эффективные свойства слоистого композитного материала для девяти выбранных областей определялись при решении задачи на первом этапе для конструкции в целом (рисунки 3.3, 3.4). Набор упругих характеристик однонаправленных и текстильных слоев, был рассчитан с использованием микромеханических моделей и соотношений теории слоистых пластин [120], приведенных в работах [18, 19, 21]. Свойства композитного материала были определены по результатам экспериментов на растяжение однонаправленных кольцевых образцов.

Для оценки запаса прочности материалов слоев предлагается использовать критерий максимальных напряжений. Условие прочности ортотропного материала в главных осях симметрии соответствует удовлетворению системы неравенств в каждой точке конструкции [20]

$$\begin{aligned} S_{11}^{c-} \leq \sigma_{11} \leq S_{11}^{c+}, S_{22}^{c-} \leq \sigma_{22} \leq S_{22}^{c+}, S_{33}^{c-} \leq \sigma_{33} \leq S_{33}^{c+}, \\ S_{12}^c \leq \sigma_{12}, S_{13}^c \leq \sigma_{13}, S_{23}^c \leq \sigma_{23}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

где S_{11}, S_{22}, S_{33} – нормальные напряжения;

S_{12}, S_{13}, S_{23} – касательные напряжения;

\pm – растяжение - сжатие.

При простых видах статического нагружения компоненты $S_{ij}^{c\pm}$ идентичны предельным напряжениям ортотропного слоя. Напряжения слоев в разных областях структуры были рассчитаны на основе средних напряжений, найденных в модели первого уровня. Запас прочности может быть рассчитан с использованием коэффициентов n_{ij} по различным составляющим напряженного состояния и материалам слоев (p), а оценка запаса прочности конструкции может быть получена из минимального значения всех коэффициентов n_{ij} и материалов p

$$n_{ij}^{(p)} = \min_{r \in V^{(p)}} \left(\frac{S_{ij}^{c(p)}}{\sigma_{ij}^{(p)}(r)} \right), \quad n = \min_{i,j,p} \left(n_{ij}^{(p)} \right). \quad (3.9)$$

Расчет НДС проводился в пакете ANSYS с использованием МКЭ. Расчет НДС конструкции в целом (рисунок 3.1) - первый этап. Расчет НДС двух сегментов оболочки (задний и передний стыки) (рисунок 3.5) - второй этап. Компьютерные модели конструкции для задач первого и второго уровня, построенные в параметрической формулировке, показаны на рисунках 3.3 - 3.5. Для дискретизации тела использовались трехмерные тетраэдрические и призматические конечные элементы SOLID186 и SOLID187 (рисунок 3.6) [27].

Соединение переднего узла стыка с крышкой было учтено в расчетной модели оболочки и ее сегментов. Крышка соприкасается с корпусом без трения и зазора благодаря шпилечному соединению. На внутреннюю поверхность оболочки и передней крышки прикладывалось давление, а силу от внутреннего давления прикладывали к заднему узлу стыка (имитация отсутствие задней крышки). Конечными элементами типа SOLID186 описывались в модели сегмента закладные элементы из металла, расположенные на заднем и переднем узлах стыка (рисунок 3.6). Между конечными элементами композитной оболочки и металлическими закладными элементами создается идеальный контакт.

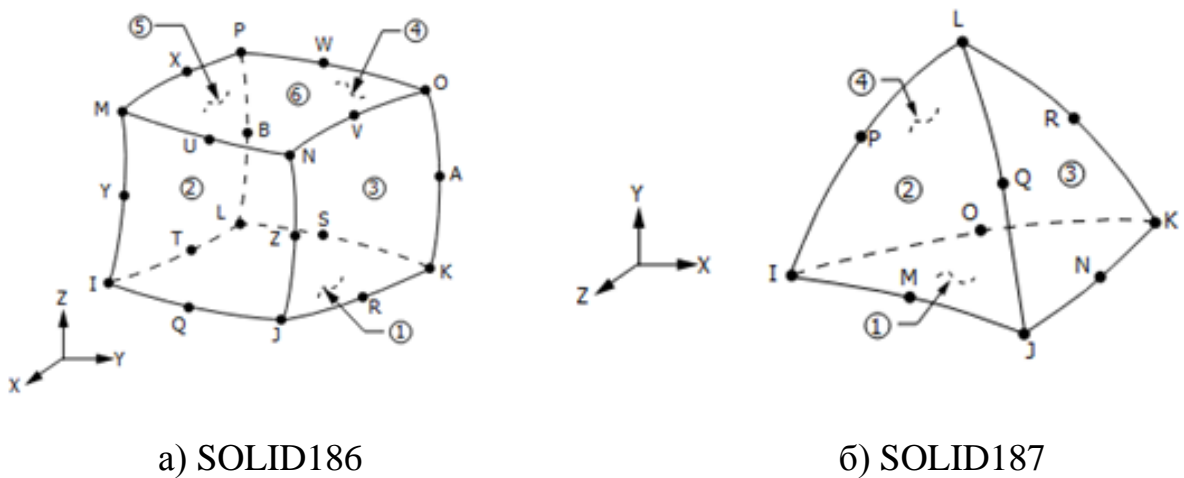


Рисунок 3.6 – Конечные элементы

Параметры сетки конечных элементов были определены на основе исследования сходимости численного решения: максимальный размер элемента составлял 2 мм, минимальный – 0,03 мм (толщина слоя композиционного материала 0,32 мм). Для описания конструкции было использовано более 7 миллионов конечных элементов. Характерно, что линейные размеры соседних конечных элементов отличались не более чем в 2 раза. Вид фрагмента модели конструкции представлен на рисунке 3.7.

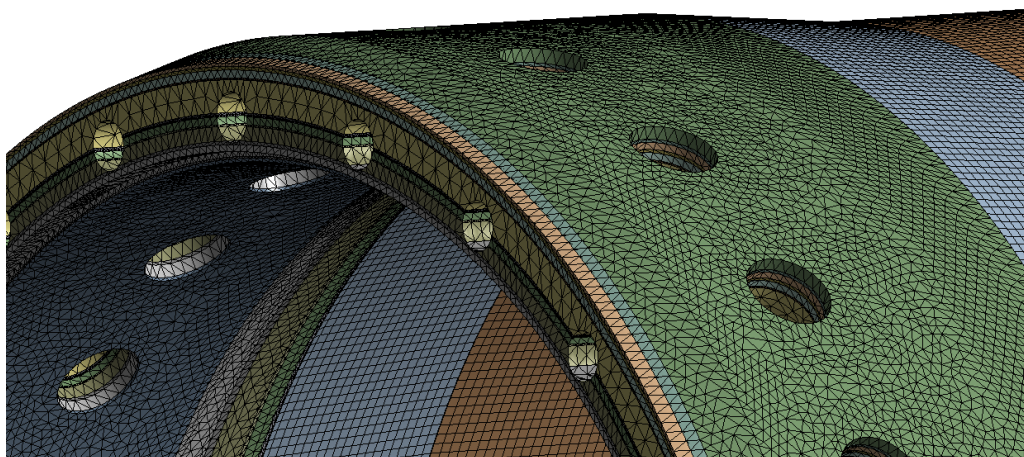


Рисунок 3.7 – Вид КЭМ

Задача расчета НДС конструкции решалась на первом этапе. В качестве граничных условий были установлены давление по всей внутренней поверхности цилиндрической оболочки и передней крышки, а также осевая сила, возникающая от действия давления на заднюю крышку по месту штифто-шпилечного соединения. С использованием моделей механики композиционных материалов упругие свойства однонаправленных слоев и слоев из ткани определялись по характеристикам волокна и матрицы [18, 19, 21] (таблица 3.1). В модели оболочки задавались упругие характеристики материала как эффективные и рассчитывались с помощью уравнения теории слоистых пластин [120] в соответственной заданной схеме армирования по зонам конструкции (рисунок 3.3) и свойствам слоев (таблица 3.2). Аналогичным образом задавались упругие характеристики материала в моделях сегмента оболочки. Металлическим закладным элементам соответствовал модуль Юнга 200 ГПа и коэффициент Пуассона 0,3.

Таблица 3.1 – ФМХ принятые в расчете

Материал	Модуль упругости, ГПа			Коэффициент Пуассона			Модуль сдвига, ГПа		
	E_x	E_y	E_z	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}
Однонаправленный слой	113,1	6,1	6,1	0,29	0,46	0,29	2,6	2,0	2,6
Ткань	34,9	26	26	0,13	0,13	0,13	6,2	6,2	6,2

Таблица 3.2 – Эффективные характеристики зон

№ зоны	Модуль упругости, МПа			Коэффициент Пуассона			Модуль сдвига, МПа		
	E_x	E_y	E_z	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}
1	43166	13593	25288	0,21	0,15	0,18	4190	4064	7992
2	31136	7173	30016	0,33	0,12	0,27	2211	2390	14919
3	35659	7182	29286	0,33	0,13	0,27	2310	2299	14220
4	35348	11394	27930	0,24	0,14	0,20	4456	4354	10058
5	31112	7178	31548	0,34	0,12	0,25	2203	2394	14245
6	52391	7071	25523	0,33	0,17	0,27	2509	2166	10911
7	31095	7183	33092	0,35	0,11	0,23	2204	2368	11498
8	35621	7198	32137	0,35	0,12	0,23	2301	2285	11004
9	32238	7209	29539	0,31	0,13	0,29	2295	2322	12818

Верификация разработанной математической модели проводилась сравнением результатов численного моделирования НДС крупногабаритной многослойной конструкции из разнородных материалов с результатами испытаний корпусов.

В таблице 3.3 представлены результаты верификации (результаты испытания и численных расчётов) по деформативным характеристикам исследуемой конструкции.

Таблица 3.3 – Результаты испытаний и численных расчетов

Верифицируемая деформационная характеристика	Испытание	Расчёт
Максимальное увеличение диаметра, мм	4,09	3,8
Удлинение корпуса, мм	-0,74	-0,68

Результаты расчёта были представлены в форме полей деформаций и напряжений. Было установлено, что наиболее нагруженной является зона 7. В этой зоне окружные напряжения, осредненные по пакету слоев, достигают значения 602,5 МПа, а осевые - 304,8 МПа. Соотношение осевых и окружных напряжений соответствует известной оценке напряжений для баллонов высокого давления [102]. Была отмечена однородность полей напряжений по зонам, отличие для зон 3, 5, 7 (рис. 3.8) составляет в среднем 10 %. Отличия обусловлены разными углами армирования и разным количеством слоев. Введение металлических вкладышей в зонах 4 и 6 приводит к увеличению жесткости и, соответственно, к снижению напряжений. В зонах 1 и 9 также наблюдается снижение напряжений из-за увеличения толщины стенки, в которую устанавливается штифты, а также в связи увеличением эффективных упругих свойств материалов указанных зон в из-за большого количества слоев ткани.

С целью верификации разработанной модели оценки НДС были сопоставлены результаты расчетов с данными полученными при нагружении корпуса внутренним давлением. На поверхности корпуса были зарегистрированы окружные перемещения величиной 3,8 мм и продольные перемещения величиной -0,68 мм, Аналогичные перемещения, рассчитанные по модели, составили 4,09 мм и -0,74 мм соответственно, что свидетельствует об идентичности разработанной модели сегментированной оболочки (погрешность не превышает 8 %).

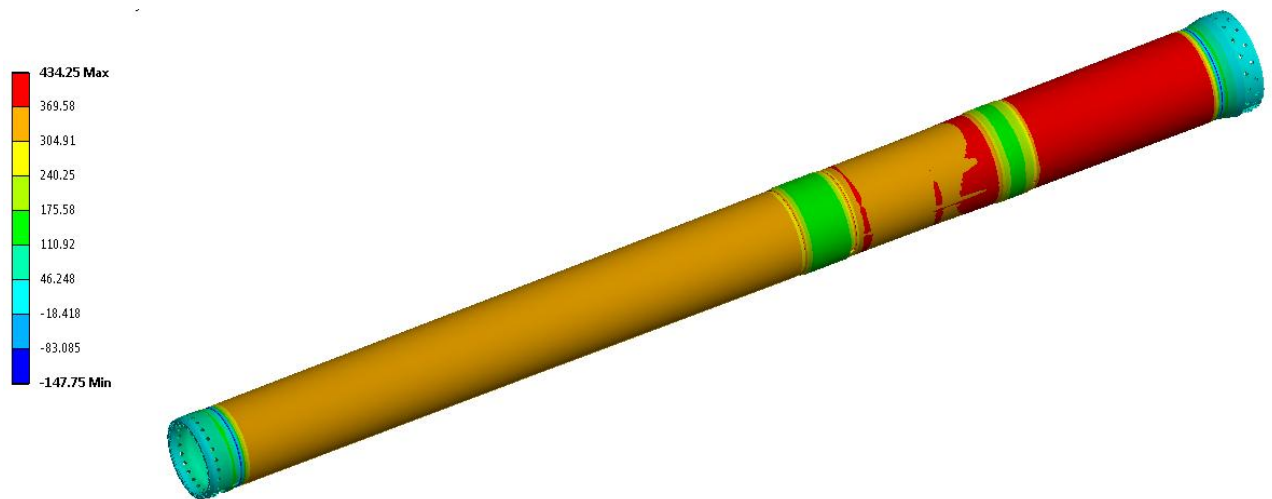


Рисунок 3.8 – Осевые напряжения в разных зонах

Анализ полей напряжений показывает возникновение высокого уровня сдвигового напряжения в плоскости слоя в зоне контакта композитной оболочки с металлическими закладными элементами, порядка - 78 МПа. Для снижения сдвиговых напряжений было предложено ввести промежуточный слой резины между закладными элементами и композитной оболочкой.

Особо опасной зоной в конструкции оболочки является окрестности у «переднего» и «заднего» узлов торцевого стыка со штифто-шпилечным соединением. Эти зоны подвергаются механической обработке, чтобы обеспечить вскрытие отверстий под штифты. Такая технологическая операция может привести к локальному повреждению краев отверстий [46, 72]. Высокие межслоевые напряжения, вызванные механической обработкой, создают негативные условия для последующего развития расслоений. В связи с указанным, в рамках решения задачи второго уровня был проведён расчет этих напряжений для двух сегментов, вырезанных из общей оболочки.

Для этих целей на границе сегмента с «отброшенной частью» оболочки были заданы перемещения, полученные в результате решения краевой задачи первого уровня для оболочки в целом. Задача для сегментов решалась в трехмерной постановке с явным описанием механических свойств слоев композитного материала, приведённых в таблице 3.2. В результате второго этапа

решения задачи были получены поля деформаций и напряжений для армирующих сегментов, металлических закладных элементов, штифтов и шпилек.

Анализ полей показал, что напряжения вблизи границы сегмента с отделенной частью оболочки имеют локальный максимум. Характерной особенностью является то, что по мере удаления от указанной границы напряжения, достигая некоторого постоянного значения, уменьшаются. Протяжённость этой зоны составляет порядка 7 % от диаметра. Следует считать, что на указанную области сегментов оказывает влияние «краевой эффект», поэтому данная область исключалась из последующего расчета.

На рисунке 3.9, в качестве примера, показаны поля осевых и окружных напряжений, которые имеют самые высокие значения напряжений в нескольких слоях сегмента заднего узла соединения. Картина распределения напряжений для других слоёв сегмента аналогична. Также было установлено, что окружные напряжения в слоях в зоне отверстия для шпильки и штифта достигают максимальных значений. Так в спиральных слоях уровень напряжений составляет 254,5 МПа, а в кольцевых слоях - 141,5 МПа (рисунок 3.9а). На внутренней поверхности штифтового отверстия в слоях с тканым армированием осевые напряжения достигают максимального значения 177,9 МПа (рисунок 3.9б). Следует обратить внимание, что напряжения в зоне штифтовых отверстий незначительны, хотя и наблюдается двух- трехкратный эффект концентрации напряжений относительно их средних значений в слое; зона концентрации имеет небольшую протяжённость порядка 0,8 мм (несколько конечных элементов).

Тем не менее, отверстия для штифтов являются наиболее опасным местом в исследуемом сегменте, поскольку при механической обработке композитный материал повреждается на кромке и внутренней поверхности отверстий, что может привести к появлению микротрещин и развитию расслоений под действием межслойных напряжений.

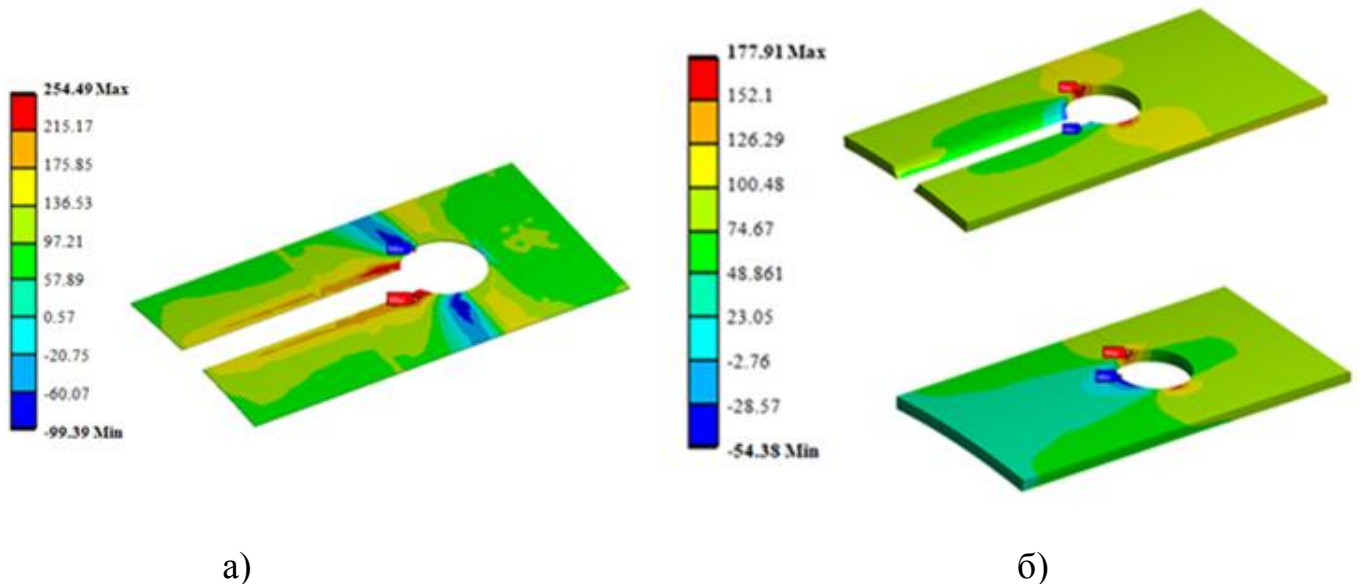


Рисунок 3.9 – Распределение окружных напряжений в спиральном слое (а) и осевых напряжений в армированных тканью слоях (б), МПа

На рисунке 3.10 показаны поля сдвиговых σ_{xy} и нормальных σ_{zz} межслойных напряжений на переднем узле стыка в слоях с максимальными осевыми напряжениями. Анализ показал, что сдвиговые напряжения σ_{xy} в кольцевом слое принимают наибольшее значение 38,2 МПа (рисунок 3.10а). В исследуемом сегменте нормальные межслойные напряжения σ_{zz} не превышают значения 14,97 МПа (рисунок 3.10б). Однако, максимальные значения напряжений, средний уровень которых в 3-4 раза выше средне слоевых напряжений, локализованы на малом участке в зоне штифтового отверстия. Опасными, для возникновения и развития расслоений в окрестности отверстий, являются напряжения межслойного сдвига σ_{yz} , σ_{xz} , которые имеют значения от 15,5 МПа до 37,5 МПа в локальных зонах, размер которых не превышает 0,3 мм (размер конечного элемента).

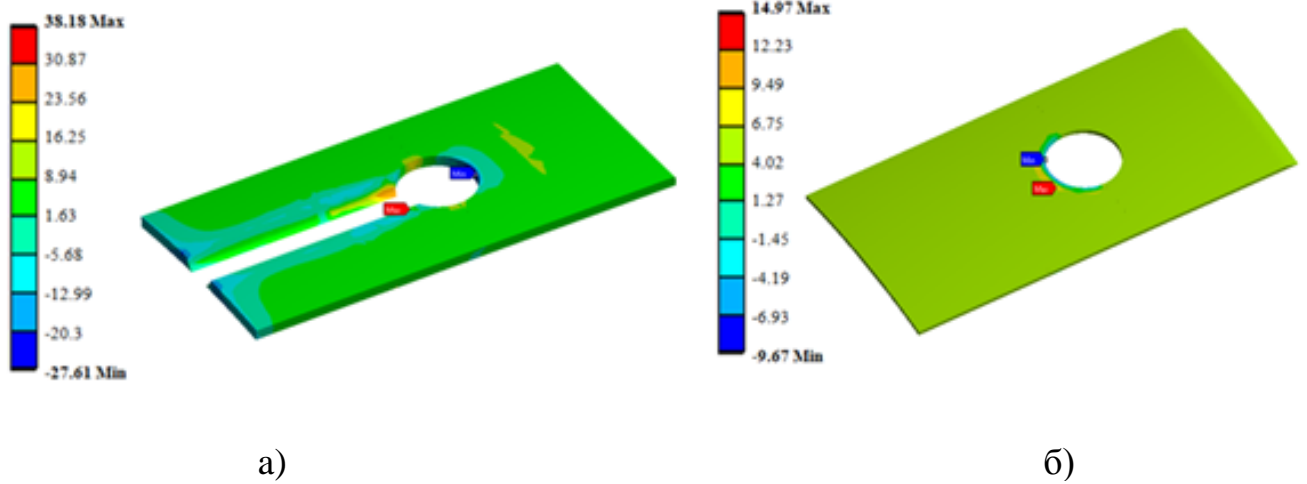


Рисунок 3.10 – Поля сдвиговых σ_{xy} напряжений в кольцевом слое №5 (а) и нормальных межслойных напряжений σ_{zz} в спиральном слое №2 (б) на переднем узде стыка, МПа

В таблице 3.4 приведены максимальные значения напряжений в локальной системе координат слоя OXYZ в армирующих слоях (ось OX соответствует направлению армирования, а ось OY - перпендикулярна оси армирования). Анализ показал, что межслойные поперечные напряжения σ_{zz} не превышают 14,97 МПа.

Таблица 3.4 – Максимальные напряжения в слоях (МПа)

№	Слой	Передний узел стыка					Задний узел стыка				
		σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{xz}	σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{xy}	σ_{yz}	σ_{xz}
1	Кольцевой	76,95	42,4	18,6	4,6	7,7	82,6	49,9	13,6	8,1	31,2
2	Спиральный	174,2	49,5	29,9	4,8	25,8	173,2	48,4	27,2	19,7	28,1
3	Кольцевой	254,3	19,8	24,9	4,5	6,6	215,9	46,9	20,2	15,5	11,5
4	Спиральный	153,6	44,8	12,1	3,2	37,5	254,5	49,1	27,5	23,1	28,2
5	Кольцевой	253,7	23,6	38,2	7,5	8,7	234,9	50,0	29,7	23,5	11,4
6	Ткань	38,3	69,5	10,7	6,7	3,8	60,2	177,9	16,6	31,1	25,7
7	Кольцевой	162,3	22,8	25,2	5,9	14,6	250,8	49,2	32,2	22,2	16,8
8	Спиральный	59,9	29,6	15,7	2,9	16,5	216,7	47,9	27,4	22,4	25,1
9	Кольцевой	72,7	18,9	21,2	5,5	21,1	168,0	47,2	35,3	23,9	13,7
10	Ткань	46,6	58,5	18,6	12,1	13,8	50,0	177,3	12,7	23,5	28,5
11	Кольцевой	131,8	12,7	18,8	6,4	10,9	141,5	48,5	17,3	14,7	18,4

σ_{xx} – напряжения вдоль армирования; σ_{yy} – напряжения поперек армирования;
 σ_{xy} – сдвиговые напряжения в плоскости слоя; σ_{yz} , σ_{xz} – сдвиговые поперечные напряжения.

Изменение напряжений по толщине пакета объясняется разной жесткостью областей, а также совместным деформированием слоёв с разным направлением армирующих волокон.

Максимальные значения напряжений наблюдаются в окрестности отверстий в кольцевых и спиральных слоях вдоль армирования (рисунок 3.10а). Эти напряжения достигают значений $\sigma_{xx} = 230 - 254$ МПа, как для заднего, так и для переднего узлов стыка (таблица 3.4). На переднем узле стыка сдвиговые напряжения σ_{xy} в основном не превышают 30 МПа в плоскости слоя и больше межслойных. Исключение из общей картины напряженного состояния составляет один слой у переднего стыка и два слоя у заднего стыка, напряжения σ_{xy} в

которых достигают значений порядка 32 – 38 МПа. На заднем узле стыка в тканевых слоях возникают высокие напряжения по утку σ_{yy} до 177,9 МПа (таблица 3.4), ориентированные вдоль оси (рисунок 3.10б) сегмента. Напряжения $\sigma_{yy} = 177$ МПа возникают в очень малой зоне (в одном элементе) (рисунок 3.10б), а уровень средних напряжений в прилегающей зоне составляет приблизительно 75 МПа. Именно слои, в основном, воспринимают осевые усилия (рисунок 3.10б), действующие от торцевых крышек. Заданием идеального контакта на границе штифт-композит частично объясняется локальная зона высокой концентрации напряжений σ_{yy} . Исследованиями по напряженному состоянию в этих местах конструкции можно уточнить, задавая условия контакта с трением по границе штифт-композит.

Приведена на рисунке 3.11 интенсивность напряжений σ_i в металлическом закладном элементе. Видно, что максимальное значение $\sigma_i = 255,3$ МПа, что в 2,7 раза меньше предела текучести данного материала.

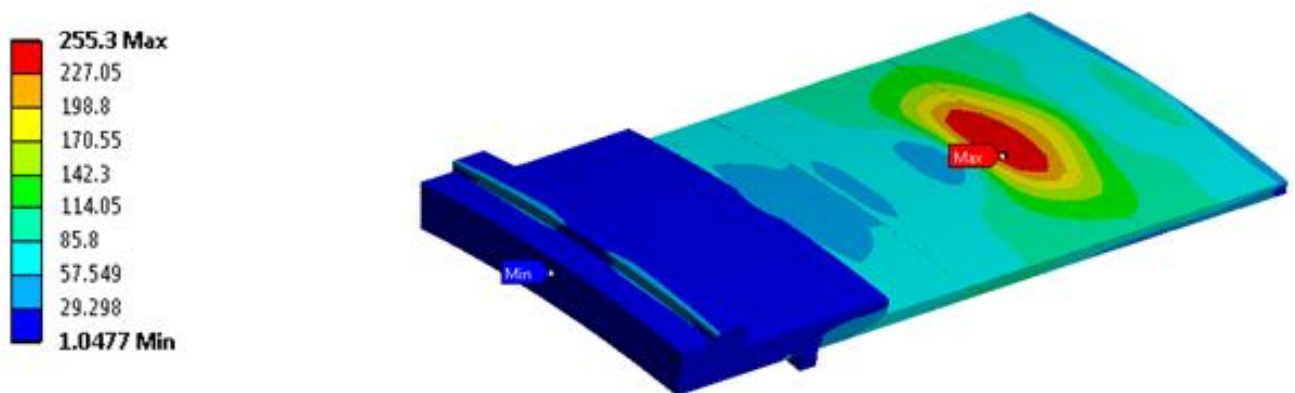


Рисунок 3.11 – Напряжения в металлическом закладном элементе, МПа

Для оценки прочности композиционного материала в сегментах использовался критерий Хашина [63]

$$fd(h) = \left(\frac{\sigma_{xx}}{S_{xx}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}} \right)^2, \quad (3.10)$$

где $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}$ – нормальные, касательные межслоистые напряжения;

S_{xx}, S_{xy}, S_{xz} – пределы прочности материала.

Межслоевому разрушению соответствует значение критерия $fd \geq 1$. Достоинством критерия Хашина является то, что он позволяет определять межслоевую прочность при наличии взаимного влияния нескольких компонент напряжений. В таблице 3.5 приведены пределы прочности слоев материалов.

Таблица 3.5 – Пределы прочности материалов (МПа)

Армирование слоя	S_{xx}	S_{yy}	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}
Однонаправленный ровинг	2374	50	40	40	40
Ткань	620	320	32	32	32

Оценка запасов прочности в соответствии с критерием максимальных напряжений (3.3) показала, что запасы прочности по напряжениям для всех слоев вдоль армирования основной ткани или ровингом имеют значения больше 10. Аналогичные запасы прочности по напряжениям вдоль утка в трех слоях, армированных тканью, составляет порядка 1,8. Запас прочности в однонаправленных слоях по поперечным напряжениям, армированных ровингом, составляет порядка 1,1. Запас прочности по межслойным нормальным напряжениям составил 3,3, запас прочности по сдвиговым напряжениям σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{xz} составил 1,4 – 1,6.

Для межслойных напряжений значение критерия Хашина (3.5) в исследуемых сегментах не превышает 1 (табл. 3.6). Таким образом, анализ прочности с учетом комбинированного воздействия нормальных и касательных напряжений показал, что межслоевое разрушение композитной оболочки в окрестности закладных элементов не должно происходить.

Напряженное состояние, достигаемое в окрестности отверстий на заднем и переднем узлах стыков является достаточно критичным к появлению межслоевого разрушения, что подтверждается высокими значениями сдвиговых напряжений σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{xz} (таблица 3.6). При этом запас прочности по критерию максимальных напряжений по этим напряжениям составляет 1,4 – 1,6, а значение критерия Хашина достигает 0,96 – 0,99 в этих слоях. В силу указанных причин

можно предположить, что механическая обработка в этой зоне внесёт дополнительные повреждения композиционного материала, что является потенциально опасным для возникновения напряжений, достаточных для развития расслоений.

Таблица 3.6 – Значения по критерию Хашина

№	Слой	Передний узел стыка	Задний узел стыка
1	Кольцевой	0,25	0,73
2	Спиральный	0,98	0,96
3	Кольцевой	0,43	0,35
4	Спиральный	0,97	0,98
5	Кольцевой	0,99	0,64
6	Ткань	0,13	0,92
7	Кольцевой	0,53	0,99
8	Спиральный	0,32	0,99
9	Кольцевой	0,56	0,97
10	Ткань	0,53	0,96
11	Кольцевой	0,30	0,45

Таким образом, расчет по модели второго уровня, показал в зоне штифто-шпилечного соединения реализуется сложное напряженное состояние композитной оболочки и высокий уровень сдвиговых напряжений, как межслойных, так и в плоскости слоя, может оказать негативное влияние на прочность композитной конструкции.

Выполненный с использованием разработанных моделей анализ межслойных напряжений в зоне контакта композитная оболочка – металлический закладной элемент позволил выделить критические зоны в конструкции, представляющие опасность с точки зрения развития расслоений и прочности.

Хорошее совпадение результатов расчёта с результатами стендовых испытаний конструкции, нагруженной внутренним давлением, позволяет говорить о достоверности разработанных моделей.

Для учета влияния расслоений на третьем этапе в модель второго уровня вводятся расслоения (рисунок 3.12). В районе переднего и заднего узлов стыка задавался дефект в виде расслоения. При этом коэффициент несплошности k , ранее введённый по формуле 2.6 принимал в конструкции следующие значения: 0 (слои без расслоений); 0,01; 0,042; 0,06; 0,08 и 0,17. Дефект в виде расслоения для уменьшения времени счёта в моделировался через раскреплённое контактное граничное условие (рисунок 3.12).

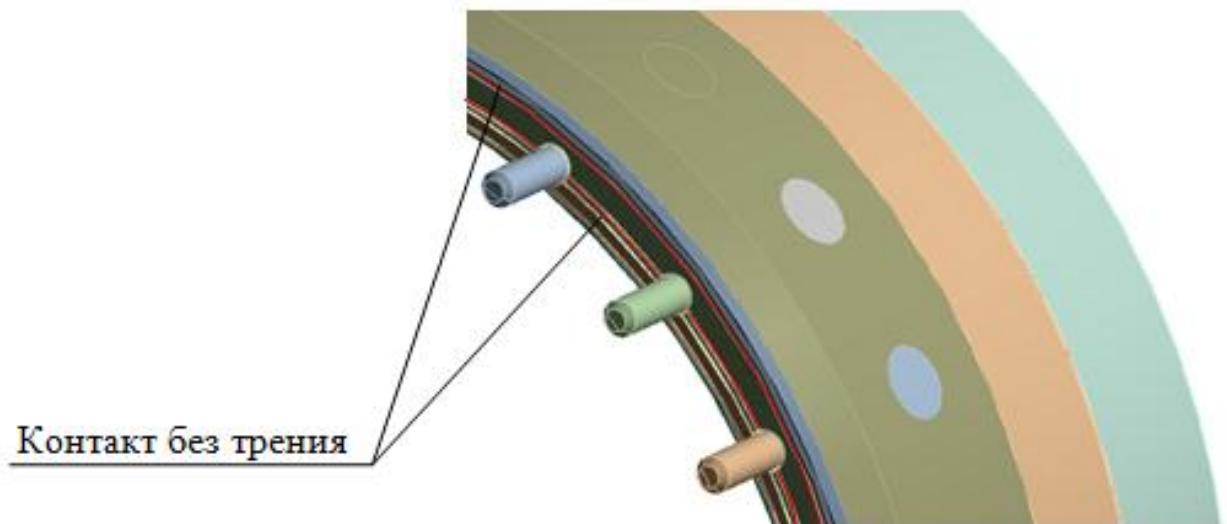


Рисунок 3.12 – Модель с раскрепленным контактом

С одной стороны, дефект в виде расслоения приводит к снижению механических характеристик материала, а с другой стороны, в зоне расслоения приводит к концентрации напряжений. Суммарный эффект, характеризующих состояние нагруженной конструкции выражается в увеличении соответствующих напряжений от расслоения, что приводит к снижению её несущей способности.

В таблице 3.7 приведены максимальные расчетные значения напряжений в соответствующих направлениях σ_x , σ_y , σ_z , для различных значений коэффициента несплошности конструкции.

Таблица 3.7 – Результаты расчета влияния расслоения на напряженное состояние цилиндрической оболочки

k	0	0,01	0,042	0,06	0,08	0,17
σ_x , МПа	189,04	190,37	193,13	195,4	197,9	200,7
σ_y , МПа	778,32	780,57	806,82	814,01	817,97	826,47
σ_z , МПа	282,63	283,17	285,71	286,15	288,8	298,26

3.2 Влияние кольцевых несплошностей на прочность штифто-шпилечного соединения в композитных корпусах

Внедрение КМ в конструкцию различных агрегатов и узлов позволяет снизить массовые характеристики изделия, увеличить ресурс и срок службы, уменьшить расходы, связанные с обслуживанием конструкций в эксплуатации. Одним из важных направлений применения конструкций из КМ является изготовление силовых корпусов, работающих под давлением.

При проектировании конструкции из КМ ее упругие и прочностные свойства в различных направлениях регулируются изменением толщин слоев и ориентацией армирующих волокон в этих слоях. Практика внедрения композитов показывает, что при изготовлении и эксплуатации многослойных конструкций на межслойных границах контакта жестких армированных слоев образуется тонкий слой связующего, а также происходит появление различных дефектов, структурных несовершенств, несплошностей, отслоений. Используемые в численных моделях оболочек из композиционного материала условия непрерывности перемещений и контактных напряжений при переходе от одного армированного слоя к другому на практике не всегда реализуются.

Свойства композита, такие как высокая удельная прочность и износостойкость, чувствительны к таким дефектам как расслоение. Отслоение является наиболее распространенным дефектом конструкции и имеет решающее значение для определения будущего использования конструкции. Из-за

эксплуатационных нагрузок или несовершенства технологии производства могут возникать расслоения в области резких изменений толщины материала и в местах сосредоточения напряжений. Деформация отслаивающегося слоя и локальная потеря стабильности с последующим увеличением зоны дефекта является одной из особенностей процесса отслаивания. При нагрузке, меньшей расчетного значения, это может привести к полному разрушению детали или конструкции.

Целью данного исследования является оценка влияния несплошностей многослойной композитной структуры при статической нагрузке на напряженно-деформированное состояние штифтового соединения. В то же время необходимо определить наиболее нагруженные участки конструкции, проанализировать результаты численного решения задачи, при необходимости учесть влияние концентраций напряжения на определенные точки расчетной конструкции, определить напряжения слоев, выбрать подходящий критерий прочности.

Конструкция цилиндрической оболочки, выполненной из многослойного композита, показана на рисунке 3.13. Основной нагрузкой для расчета штифто-шпильчатого соединения является осевая сила полученная от внутреннего давления.

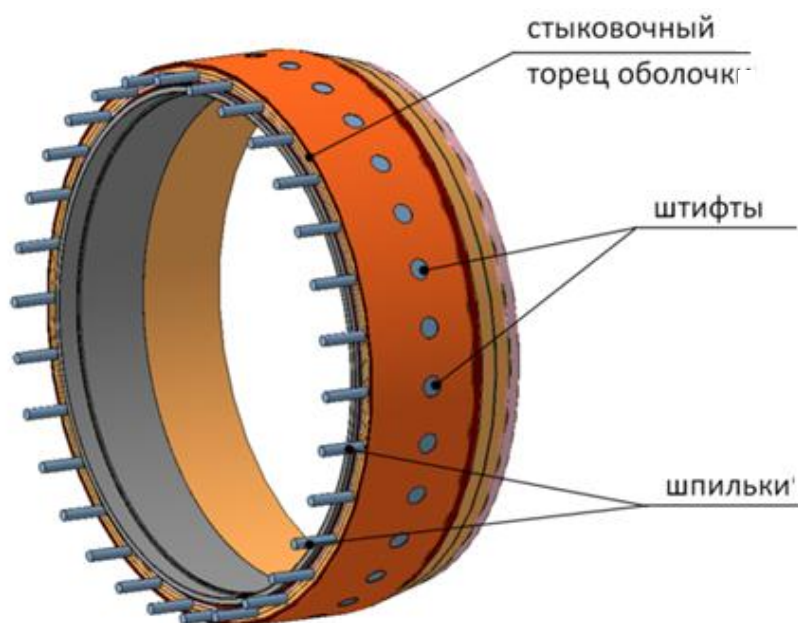


Рисунок 3.13 – Конструкция ШШС корпуса из композиционных материалов

На основе конструкторской документации была построена трехмерная модель корпуса со следующими предположениями: расслоение между слоями моделировалось за счет трения, возникающего между ними. Для расчета были разработаны следующие модели: одна без расслоений и две модели с расслоениями по цилиндрической части осевом направлении (рисунок 3.14):

- модель I: длина расслоений от торца цилиндрической оболочки вдоль оси равна 30 мм по всем слоям (такой вид расслоений был зафиксирован на изготовленных корпусах);

- модель II: длина расслоений от торца цилиндрической оболочки вдоль оси равна 50 мм в середине пакета (по оси шпилек) до середины штифта.

Задача была решена методом конечных элементов. Чтобы уменьшить объем вычислительной модели, в расчетную схему была включена часть оболочки, представляющая 1/30 (в зависимости от количества штифтов) цилиндрической поверхности (рисунок 3.14).

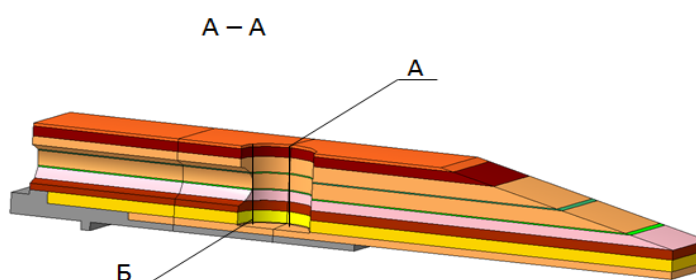
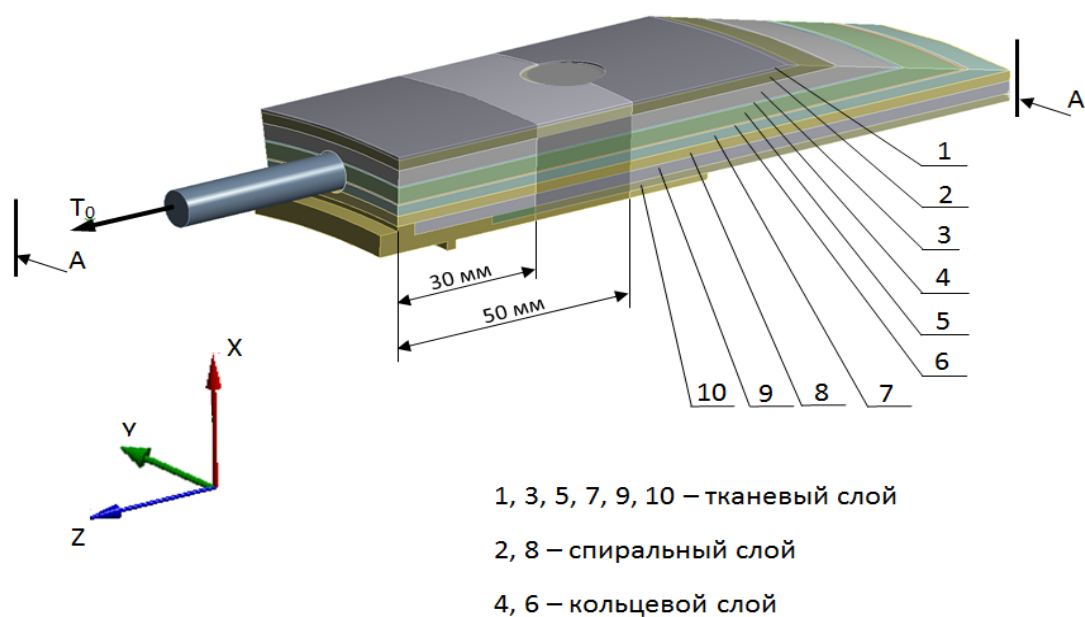


Рисунок 3.14 – Расчетная модель конструкции корпуса из КМ с ШШС

Принимая во внимание испытания образцов без расслоения, были использованы физико-механические характеристики, предусмотренные для каждого слоя. Расчет был произведен для сравнительной оценки прочности конструкции от растягивающей силы, действующей на шпильку, от пересчета давления разрушения из $P_{раз} = 16,6$ МПа и максимального рабочего давления $P = 8$ МПа. В этом случае критерием работоспособности конструкции корпуса является максимально приемлемый уровень напряжений, достигаемый при давлении разрушения [139]. Анализ полученных расчётных значений радиальных и кольцевых напряжений выявил большой разброс полей данных, так как прочность материала зависит от направления армирования слоев, что соответственно затруднило проведение сравнительного анализа. Для дальнейшего исследования и сравнительного анализа были выбраны напряжения в характерных зонах осевом направлении.

Изменение осевых напряжений по слоям в перемычке – это сечение между штифтами, по линии А (рисунок 3.14) выведены на рисунке 3.15. На рисунке 3.16 приведены графики изменения напряжений смятия по слоям в окрестности контакта штифта с композитной оболочкой по линии Б.

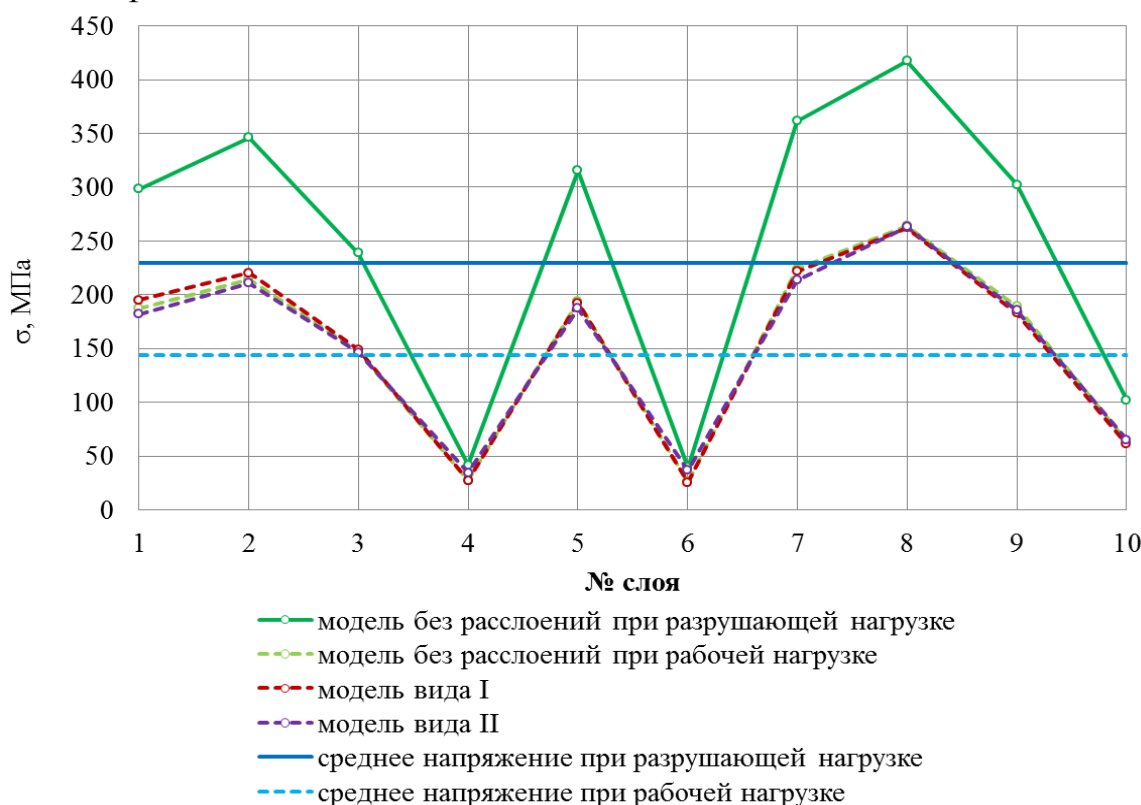


Рисунок 3.15 – Изменение напряжений между штифтами по линии А

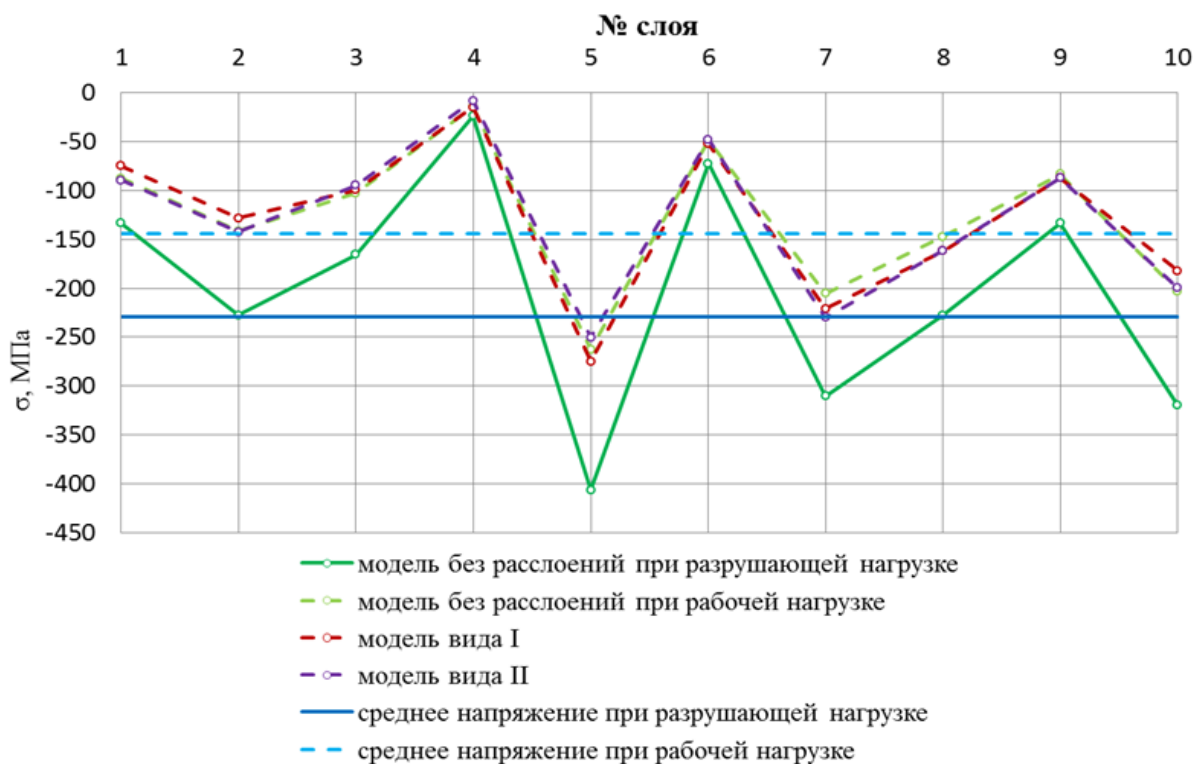


Рисунок 3.16 – Изменение напряжения смятия в зоне контакта штифта с композитной оболочкой по линии Б

Как видно из рисунков 3.15 и 3.16 графики изменения напряжений по слоям для всех исследуемых моделей имеют близкий по пикам характер. Пикообразные изменения напряжений в слоях по толщине рассматриваемых пакетов иллюстрируют разную долю нагрузки, приходящую на определенный слой. Пики напряжений в слоях 2, 5 и 8 (рисунок 3.15) указывают на передачу осевых усилий от цилиндрической оболочки к штифту. Уровень осевого натяжения отличается в спиральных слоях 2,8 (рисунок 3.15), который фактически нагружен за счет трения слоя 2 и не имеет стандартного контакта с цилиндрической оболочкой. Предел прочности на образцах из ткани составляет 620 МПа, что выше уровня максимальных напряжений в тканевых слоях корпуса при разрушающей нагрузке 417 МПа. Практическое совпадение графиков моделей вида I и II указывает о небольшом влиянии рассматриваемых в моделях расслоений на прочность ШШС. Отверстия под шпильку вызвали повышенные напряжения смятия в тканевых слоях 5 и 7 (рисунок 3.16), уровень которых соответствует уровню средних напряжений в пакете при разрушающей нагрузке. Пиковые напряжения в

тканевом слое 5 почти в 2 раза превышают уровень средних напряжений как при рабочей, так и при разрушающей нагрузке. В целом полученные картины напряжённого состояния свидетельствуют о неравномерном напряженном состоянии в пакете слоев из ткани.

Необходимо обратить внимание, что в узлах штифто-шпилечного соединения появляется сложное напряженное состояние и как следствие происходит снижение высоких прочностных характеристик композиционного материала в направлении армирования и дальнейшее разрушение конструкции из-за появлений изгибов детали и расслоений с потерей жесткости. Предложенная методика расчета позволяет дать лишь приближенную оценку прочности и несущей способности корпуса с расслоениями. Расчётами также показано, что расслоения по цилиндрической части между слоями композита в принятой расчетной схеме на прочность корпуса практически не влияют.

Предложенный алгоритм расчета позволяет оценить несущую способность оболочки с расслоениями при действии на неё осевой силы, обусловленной внутренним давлением. Проведённые исследования напряжённого состояния ШШС позволяют сделать вывод о работоспособности конструкции, если область несплошности в многослойной оболочке по шпильке не более расстояния от края оболочки до отверстия под штифт.

3.3 Влияние появления межслоевых дефектов на работоспособность резьбового соединения в композитном материале

Применение в композитных конструкциях разнородных материалов как из КМ, так и металлических порождает новые проблемы, связанные с их соединением между собой. Этот вопрос осложняется тем, что материалы такой конструкции имеют разные физико-механические характеристики (ФМХ) и коэффициенты линейного теплового расширения (КЛТР) [71].

Болтовые соединения имеют ряд преимуществ при использовании в композитных конструкциях по сравнению с другими: неразрушающий демонтаж,

низкая чувствительность к климатическим воздействиям и технологичности при изготовлении [76]. Вскрытие отверстий для болтового соединения производится путем перерезания армирующих волокон, что снижает несущую способность корпуса. Использование соединения деталей в металлических конструкциях увеличивает её массу на 15...25 % по сравнению с регулярным сечением. При этом именно в этих соединениях, как правило, возникает примерно до 80 % разрушений. В конструкциях из КМ увеличение веса от использования стыков составляет примерно 60...70 %. При этом прочность механических соединений из КМ в 2-3 раза меньше, чем металлических [141], и определяется уровнем концентрации напряжений около отверстий. Как правило, разрушение таких конструкций начинается в зоне поверхности отверстий вне зависимости от вида приложенной нагрузки [95]. Большое влияние на прочность этих зон оказывает наличие межслоевых несплошностей.

Несмотря на то, что ПКМ получили широкое использование в технике влияние межслоевых разрывов, таких как расслоение, на статические и динамические силы в области узлов соединения не было полностью изучено [88]. В связи с этим для получения достоверных прочностных характеристик, применяемых разработчиком, принята практика проведения испытаний.

В данной части исследования была поставлена задача определения влияния возникшего при изготовлении дефекта в композитном материале на работоспособность резьбового соединения в условиях статической нагрузки. В ходе исследования были определены наиболее нагруженные участки численной конструкции, определены напряжения в каждом слое, а для оценки прочности подобран соответствующий критерий. При этом учитывалось влияние концентраторов напряжений на особые точки численной расчетной модели.

На рисунке 3.17 показана численная модель конструкции резьбового соединения, состоящего из втулки, винта и многослойного композита. Основной нагрузкой является растягивающая сила Q , возникающая вдоль оси втулки. Численно-аналитическая модель представляет собой фрагмент части

многослойного цилиндрического корпуса, выполненного намоткой из органо-жгута и органо-стекловолокна, пропитанного связующим.

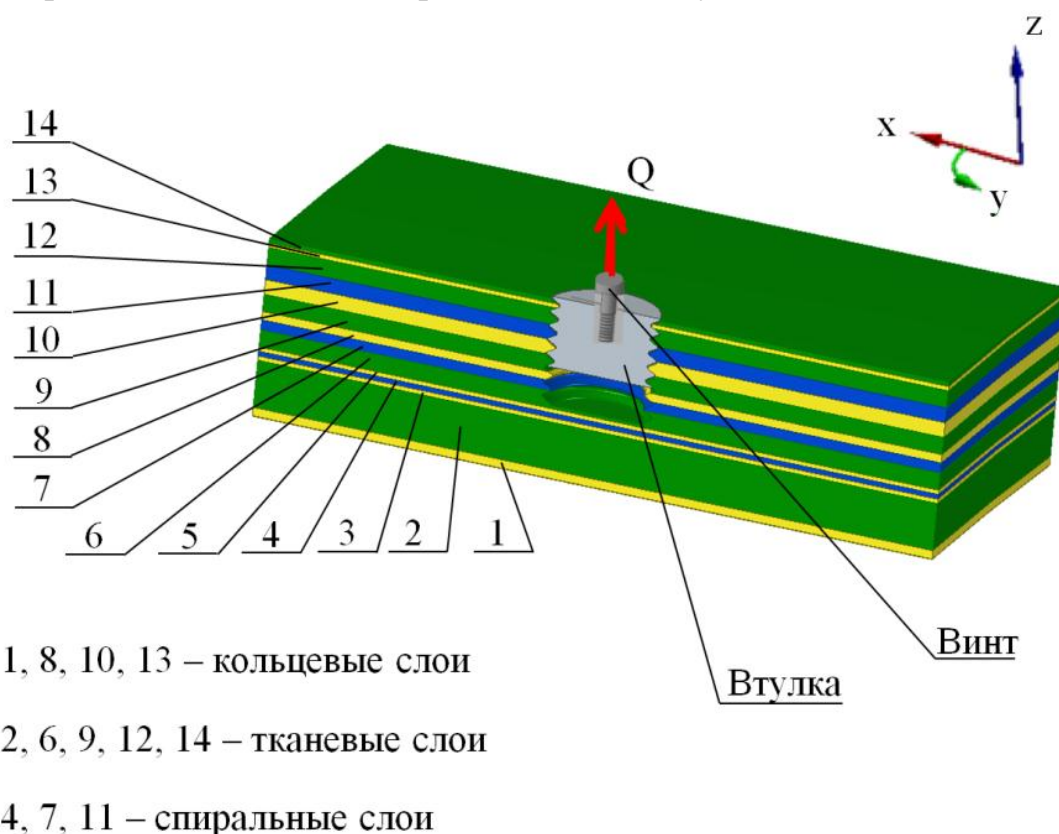


Рисунок 3.17 – Расчетная модель соединения в конструкции из КМ

Винт М8 (рисунок 3.17) вворачивался с усилием, соответствующим моменту затяжки $M = 1,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$, во втулку, завернутую в многослойную модель. В расчете применялись ФМХ материалов представленные в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – ФМХ материалов элементов

Элемент конструкции (материал)	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Разрушающее напряжение при срезе $\tau_{ср}$, МПа	
			по основе	по утку
Втулка (сплав титановый ОТ4)	700	600	-	-
Цилиндрический корпус(КМ)	-	-	170	130
Винт (сталь 30ХГСА)	1000÷1200	900	-	-

Нагружение втулки моделировалось моментом затяжки винта $M = 45 \dots 50 \text{ Н} \cdot \text{м}$, что соответствует приложению максимального усилия,

$$Q = \frac{M}{f \cdot d} = 46 \div 51 \text{ кН}, \quad (3.11)$$

где $f = 0,12$ – коэффициент трения в резьбе [32];

$d = 8 \text{ мм}$ – диаметр резьбы винта.

В результате проведенного эксперимента разрушение произошло по резьбе композитного корпуса, при этом витки резьбы композитных слоев оказались полностью срезанными. Из численного расчета выявлено, что сила между витками втулки при возникновении нагрузки распределяется неравномерно. Витки на наиболее растянутой части металлической втулки взаимодействуют с витками многослойной конструкции, находящиеся в сжатом состоянии, что приводит к неравномерности распределения нагрузки по виткам.

С использованием МКЭ было получено напряженно-деформированное состояние резьбового соединения с усилием, рассчитанным в соответствии с соотношением (3.7). Расположения слоев и углов армирования в многослойных комбинированных конструкциях определяет однородность структуры и прогноз прочностных характеристик композитов полученной конструкции. Когда форма конструкции изменяется под воздействием возрастающей нагрузки, происходит изменение взаимодействия в слоях, что влияет на изменение давления слоев между собой и, как следствие, приводит к срезу или смятию [118].

Для конечно-элементного анализа (КЭА) верификация результатов с использованием натурального эксперимента является основной задачей в получении достоверных результатов расчёта. Однако сложности, возникающие при постановке эксперимента, не позволяют получить в критичных местах необходимую информацию о состоянии конструкции.

В результате численного анализа получен большой разброс данных кольцевых и радиальных напряжений, поэтому, чтобы выбрать критерий оценки

прочности, приняты напряжения в направлении, перпендикулярном слоям армирования в зоне резьбы.

Расчет средних напряжений среза резьбы М16 металлической втулки определен

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot \beta \cdot k_m \cdot H} = 170 \div 190 \text{ МПа}, \quad (3.12)$$

где $d = 16 \text{ мм}$ – диаметр втулки;

$\beta = 0,87$, $k_m = 0,75$ – коэффициенты соответствия [32];

$H = 8 \text{ мм}$ – высота рабочих витков втулки, что соответствует пределу прочности на срез пластика на основе ткани.

На рисунках 3.18, 3.19 и 3.20 приведены графики изменения поперечных напряжений по слою 9 - тканевый слой, слою 10 - кольцевой слой и слою 11 - спиральный слой от приложенного усилия Q .



Рисунок 3.18 – Зависимость напряжения от воздействия усилия в слое 9

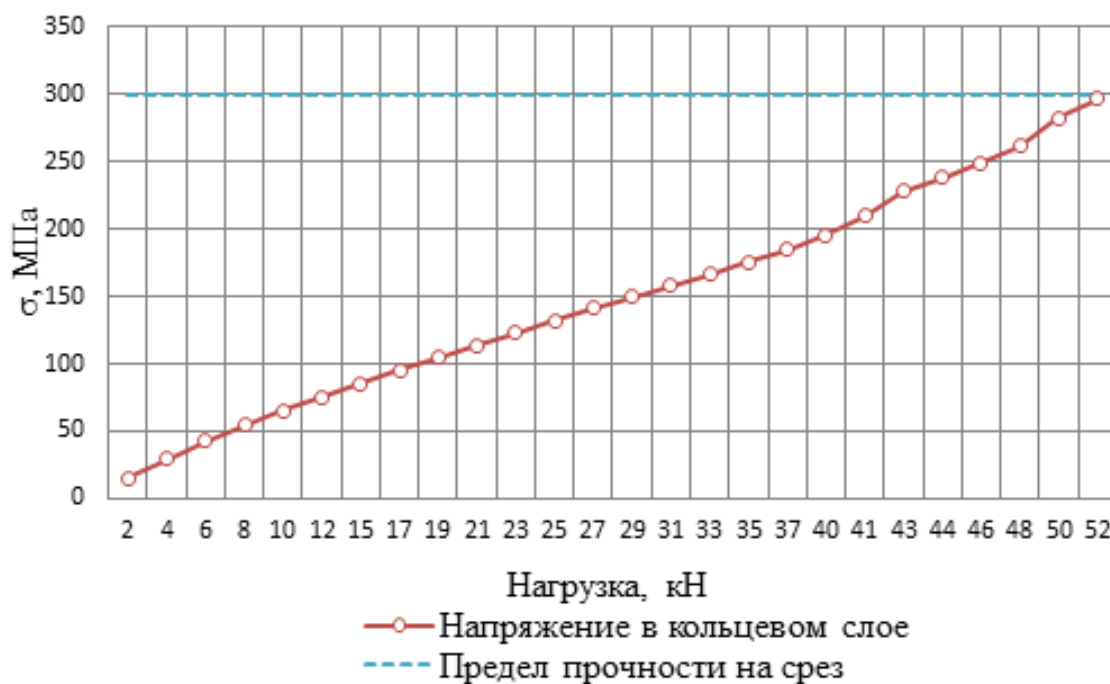


Рисунок 3.19 – Зависимость напряжения от воздействия усилия в слое 10

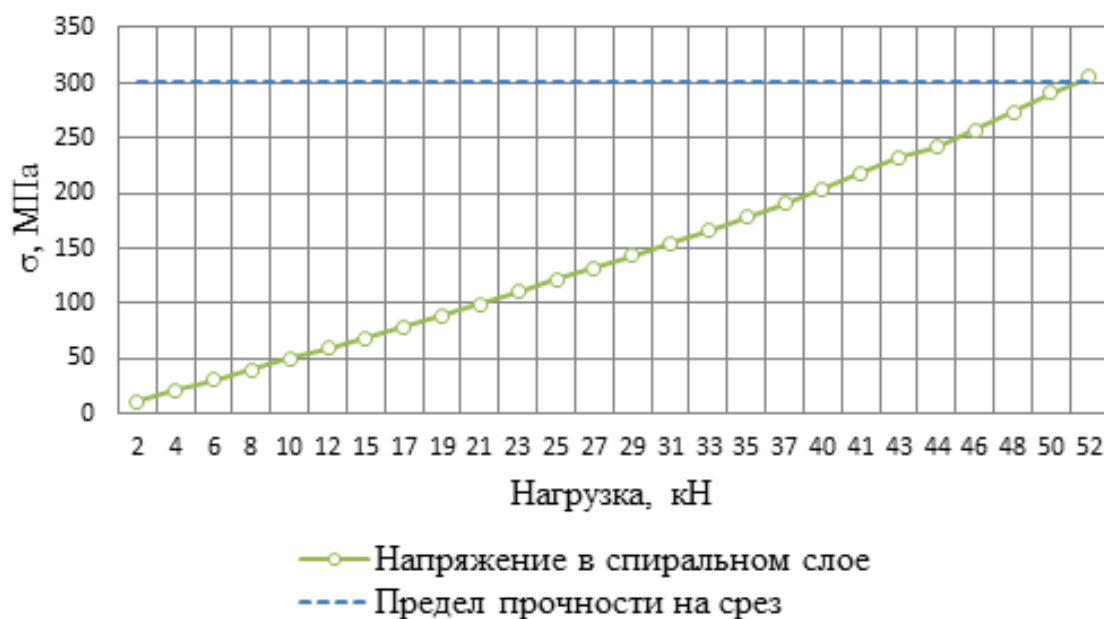


Рисунок 3.20 – Зависимость напряжения от воздействия усилия в слое 11

Из анализа рисунка 3.18 видно, что при нагрузке 8,5 кН происходит срез по толщине тканевого слоя, и вся последующая нагрузка перераспределяется между спиральным 11 слоем и кольцевым 10 слоем. Максимальное усилие вырыва втулки, полученное на опыте составляет 46 ... 51 кН и соответствует реализованному при численном расчете уровню 52 кН (рисунок 3.19).

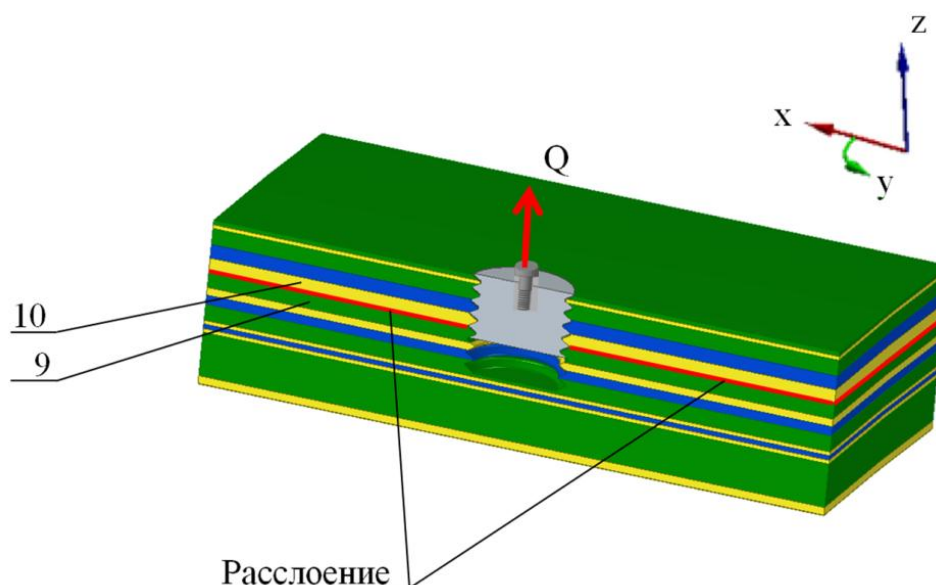


Рисунок 3.21 – Расчетная модель конструкции с расслоением

В разрабатываемую расчетную модель конструкции было введено расслоение между слоями 9 и 10 в виде контакта с коэффициентом трения 0,3 (рисунок 3.21).

Результаты расчета проиллюстрированы в виде графиков на рисунках 3.22 и 3.23, из которых видно, что характер изменения напряжений практически одинаковый по слоям. При этом несущая способность на срез существенно снизилась и составила: в спиральном слое – 24 кН, в кольцевом слое – 22,5 кН в сравнении с конструкцией без расслоений (рисунки 3.19 и 3.20).

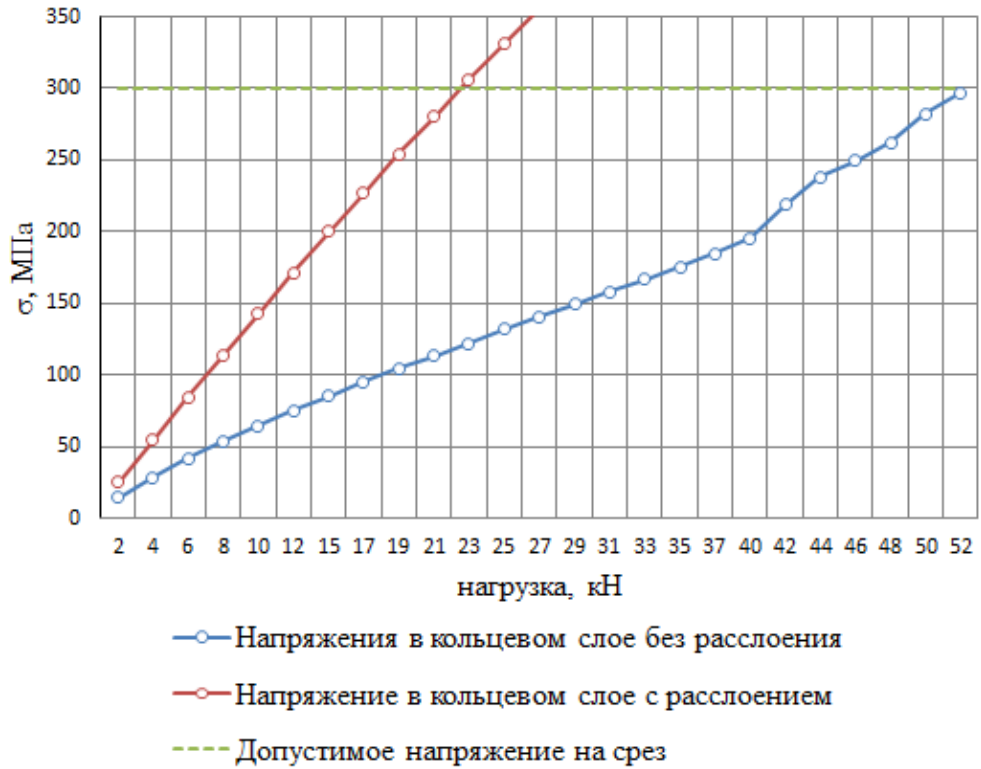


Рисунок 3.22 – Зависимость напряжений среза в кольцевом слое в бездефектной конструкции и с расслоением



Рисунок 3.23 – Зависимость напряжений среза в спиральном слое в бездефектной конструкции и с расслоением

Несущая способность кольцевых и спиральных слоев снизилась на 50 % по результатам расчета корпуса из многослойного композита.

Расслоение привело к повышению действующих напряжений среза в тканевом слое, уровень которых превышает допустимый. Смоделированные расслоения снизили несущую способность резьбового соединения в 2 раза (рисунки 3.22 и 3.23).

На основе анализа полученных результатов проведенных экспериментов и расчетов предложены пути усовершенствования рассматриваемых конструкций, связанные с обеспечением прочности и решением производственных задач металлопластиковых соединений, а именно выбор режимов и методов механической обработки резьбового соединения. Например, пропитка при установке резьбового соединения эпоксидными составами (ЭП-00-20 или ЭД-20).

Выводы по главе 3

1. Разработана математическая модель и программное обеспечение на основе метода конечных элементов, позволяющая проводить трёхмерный анализ напряженно-деформированного состояния композитных оболочек, составленных из разнородных композиционных структур и имеющих межслойные расслоения.

2. Анализом НДС показано, что наиболее опасными для конструкции являются межслойные и сдвиговые напряжения в плоскости слоев, локализованные в малых зонах в окрестности штифтового соединения. Эти напряжения могут вызвать появление и развитие расслоений, особенно после механической обработки отверстий корпуса.

3. Корпус, нагруженный статическим давлением остаётся работоспособным, если область расслоения в многослойной композиционной оболочке не более длины от стыковочного торца отверстия под штифт до края оболочки.

4. Межслоевое расслоение композита корпуса в зоне резьбового соединения повышает уровень напряжений среза, действующих в тканевом слое

(выше допустимого уровня), что приводит к перераспределению нагрузки между кольцевыми и спиральными слоями и снижению несущей способности рассматриваемой зоны примерно в 2 раза.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОРПУСОВ РДТТ ПРИ ЧАСТИЧНОМ РАССЛОЕНИИ УЗЛОВ СТЫКА

4.1 Алгоритм расчета

Корректное моделирование форм разрушения играет важную роль в модульных программах исследований. Так как формы повреждений часто зависят от условий испытаний, изначальной дефектности структуры композита (производственные дефекты, недостатки конструкции, случайные повреждения и др.), то важно тщательно выбирать образцы для испытаний.

В идеальном случае, если инструменты прочностного анализа достаточно изучены и установлены критерии разрушения, то прочностные свойства могут быть спрогнозированы по свойствам компонентов материала. В настоящее время современные расчетные методы не позволяют с достаточной степенью точности получить решение указанной задачи. Таким образом, экспериментальные данные с низшего уровня проектирования часто не всегда могут быть использованы для корректного прогнозирования свойств структурных элементов и компонентов на более высоком уровне [61]. Точность прочностных расчетов снижается за счет вариативности свойств материалов, наличия дефектов, масштабного эффекта и др. Поэтому поэтапные испытания модулей необходимы для:

- выявления форм разрушений, которые не могут быть определены через испытания на более низком уровне;
- проверки и доработки расчетных методов, которые были подтверждены на низшем уровне;
- учета дефектов в сформированной конструкции, которые часто отсутствуют в образцах и элементах (например, случайные повреждения при ударе).

Такой комплексный подход создает многоуровневую систему исследования, начиная с малых образцов, через элементы конструкции, детали, узлы и заканчивая полномасштабным изделием. Каждый уровень основывается на результатах расчетов или экспериментов, полученных на предыдущих, менее

сложных уровнях. Этот процесс известен как подход «Стандартного блока» - блочный (модульный) принцип конструирования.

В методике предлагается модульный принцип конструирования, т.е. стандартные блоки объединены с базисными технологиями и общими положениями проектирования. Программа обладает большей экономической эффективностью, если в ней преобладают испытания небольших, менее дорогих образцов, и в меньшем объёме требуются испытания уже готовых полноразмерных крупногабаритных изделий. Однако таким подходом должно быть обеспечено надёжное, качественное решение поставленной задачи.

Результаты, полученные из расчетов и экспериментов на предыдущем уровне, в совокупности с эксплуатационными, техническими требованиями используются для определения и выполнения следующего уровня проектирования и исследования.

Если приемлемый аналитический результат не получен, то производится доработка конструкции и/или корректировка метода расчета до достижения надежного результата. По достижении приемлемого результата проводится экспериментальная проверка.

Если результаты испытаний не согласуются с расчетами, то проверяется методика испытаний или изменяются конструкция и/или метод расчета. Соответствующие процедуры проводят до тех пор, пока результаты испытаний не подтвердят аналитический прогноз.

На рисунке 4.1 представлен алгоритм расчета для получения напряженно-деформированного состояния крупногабаритной композитной цилиндрической конструкции из разнородных материалов с дефектом в виде расслоения под действием внутреннего давления.



Рисунок 4.1 – Алгоритм расчета для получения напряженно-деформированного состояния крупногабаритной многослойной конструкции из композитных материалов

Модель 1 соответствует геометрическим размерам и схеме армирования конструкции без расслоений. Модель 2 – это усеченная модель с граничными условиями и более детальной прорисовкой. Модель 3 – это усеченная модель с подробной детализацией и зонами расслоения.

Выполнение этапов разработанного алгоритма реализовано в ПК конечно-элементного анализа *ANSYS Workbench* при помощи модуля статического конструкционного анализа *Static Structural* (рисунок 4.2), и состоит из последующих основных этапов:

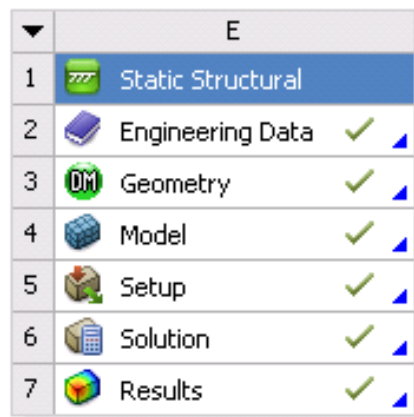


Рисунок 4.2 – Модуль конструкционного анализа *Static Structural*, где: *Engineering Data* – задание свойств материалов; *Geometry* – построение геометрической модели; *Model* – построение конечно-элементной модели; *Setup* – задание граничных условий; *Solution* – расчет конечно-элементной модели; *Results* – анализ результатов

На первом этапе производится построение геометрической модели 1. Модель 1 это цилиндрическая многослойная конструкция из композитных материалов, силовая оболочка ее состоит из твердотельных (гомогенизированных) секторов или выполненная монолитно. На рисунке 4.3 показан общий вид.

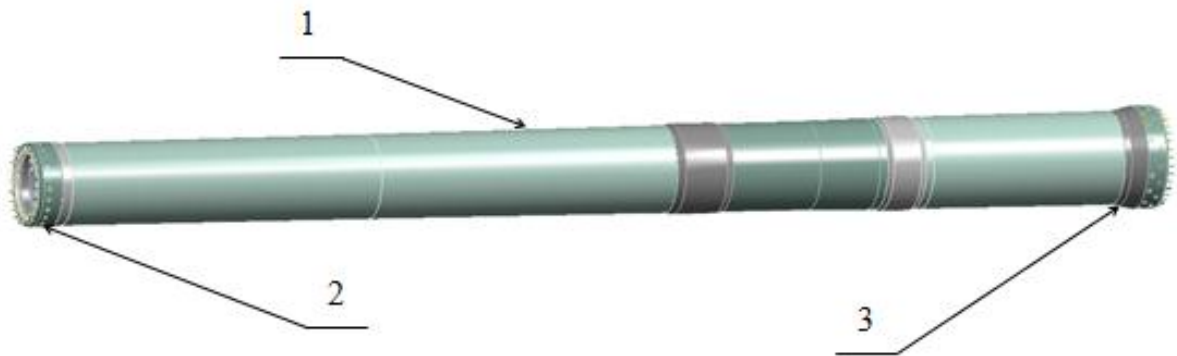


Рисунок 4.3 – Общий вид модели крупногабаритной многослойной конструкции.

1 – силовой корпус, 2 – ПУЗ, 3 – ЗУС

Построение геометрической модели осуществляется в любом пакете-построителе и передается в ANSYS. После построения геометрии необходимо всем элементам конструкции присвоить свойства материала (рисунок 4.4).

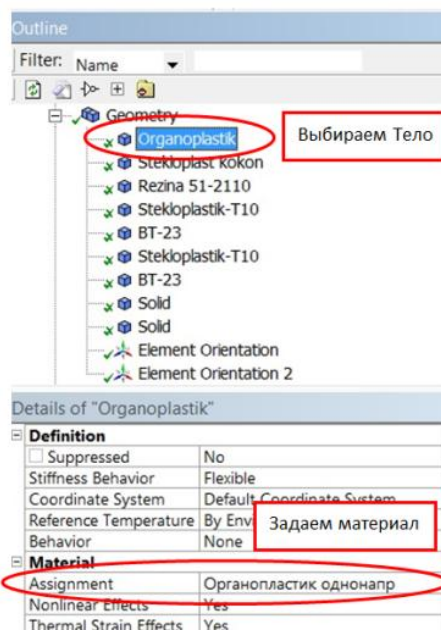


Рисунок 4.4 – Присвоение свойств материала модели

Для упрощения процедуры расчета было предложено заменить слоистую модель на упрощенную объемную твердотельную модель с секторами (на силовой оболочке), учитывающую изменение жесткости конструкции в зависимости от

изменения угла намотки. Методика определения эффективных упругих свойств секторов подробно описана в разделе 4.2.

Телам, которые выполнены из ПКМ необходимо задать локальную систему координат, где координата Z – это толщина (рисунок 4.5 – 4.6).

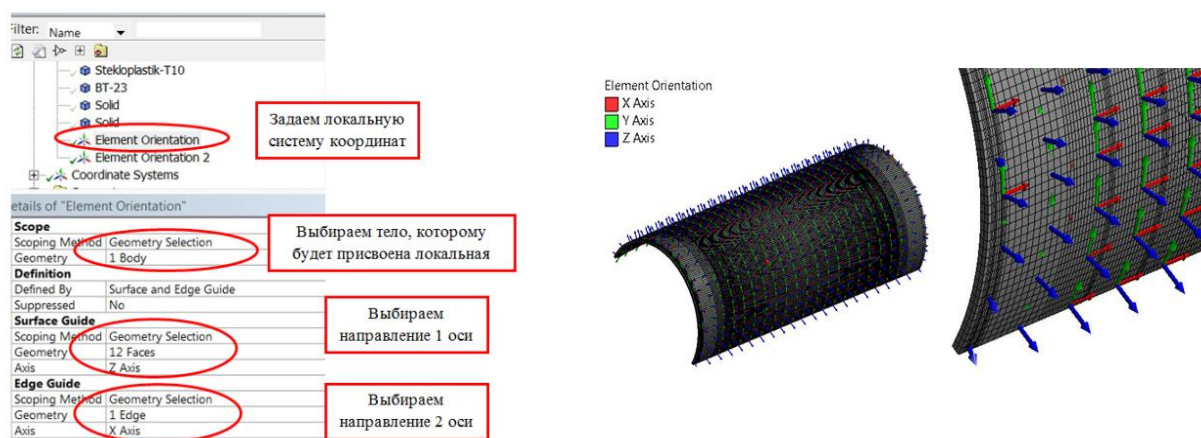


Рисунок 4.5 – Создание локальной системы координат слоя

Рисунок 4.6 – Локальная система координат слоя

Следующим шагом при решении данной задачи является построение конечно-элементной сетки (рисунок 4.17).

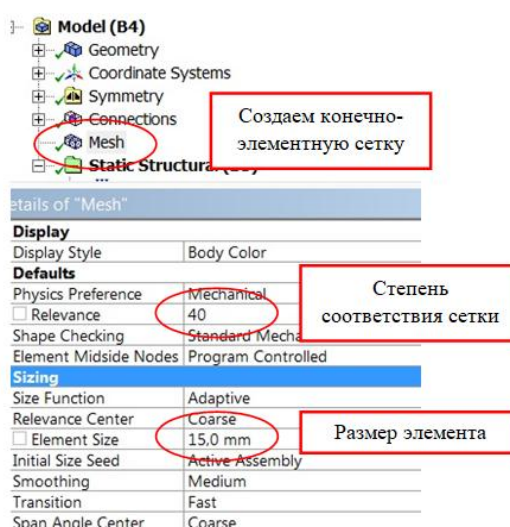


Рисунок 4.7 – Настройки конечно-элементной сетки

В процедуре должно быть проведено исследование сходимости решения МКЭ по плотности сетки. Если при переходе к более плотной сетке

максимальные напряжения изменяются не более, чем на 5 %, этап выбора оптимальных размеров КЭ считается завершенным.

Схема граничных условий соответствует закреплению конструкции при проведении испытаний или моделирует рабочие условия. Пример: согласно схеме, при проведении испытаний конструкция располагается горизонтально (рисунок 4.8).

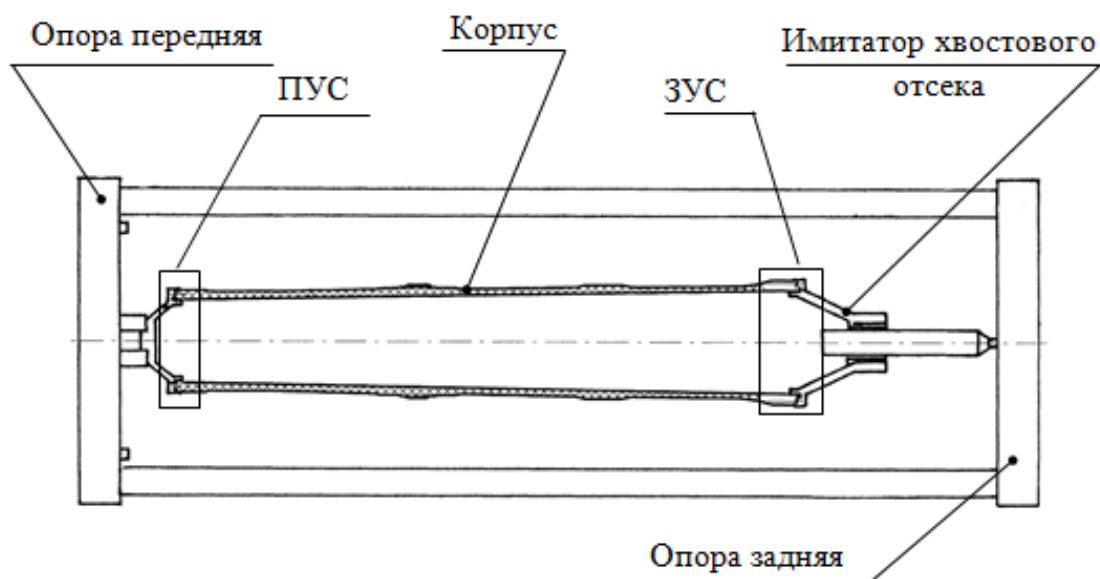


Рисунок 4.8 – Схема проведения испытаний

На рисунке 4.9 показан способ задания граничных условий при численном моделировании. Схема граничных условий для численного расчета показана на рисунке 4.10.

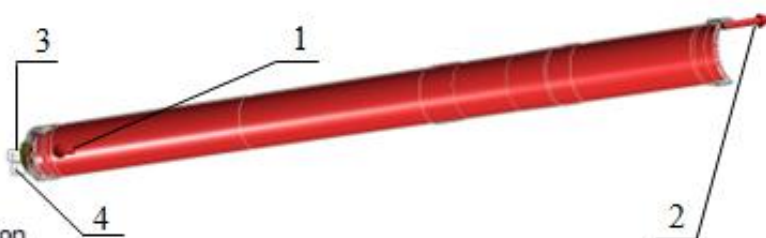
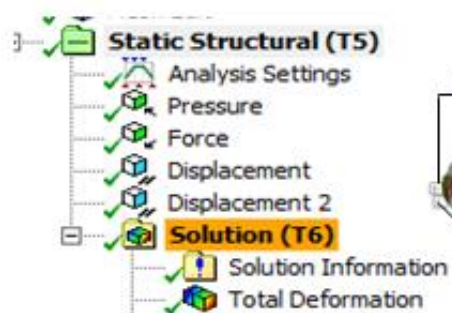


Рисунок 4.9 – «Дерево» граничных условий

Рисунок 4.10 – Схема граничных условий при численном анализе

Описание граничных условий отмеченных на рисунке 4.10 представлено ниже:

- (1) – Распределенное избыточное давление, приложенное на внутреннюю поверхность корпуса.
- (2) – Сила, имитирующая отсутствие хвостового отсека.
- (3) – Граничное условие подвижный шарнир (запрет перемещений вдоль направления нормали к поверхности).
- (4) – Граничное условие жесткая заделка, запрет осевых перемещений на внутренней поверхности отверстий, болтового соединения.

Раскрепления в численной модели, задаются в соответствии со схемой раскрепления.

Считается, что на всю конструкцию действует объемная нагрузка, соответствующая силе тяжести жидкости и конструкции.

После задания граничных условий происходит запуск модели 1 на расчет «Solve» (рисунок 4.11).

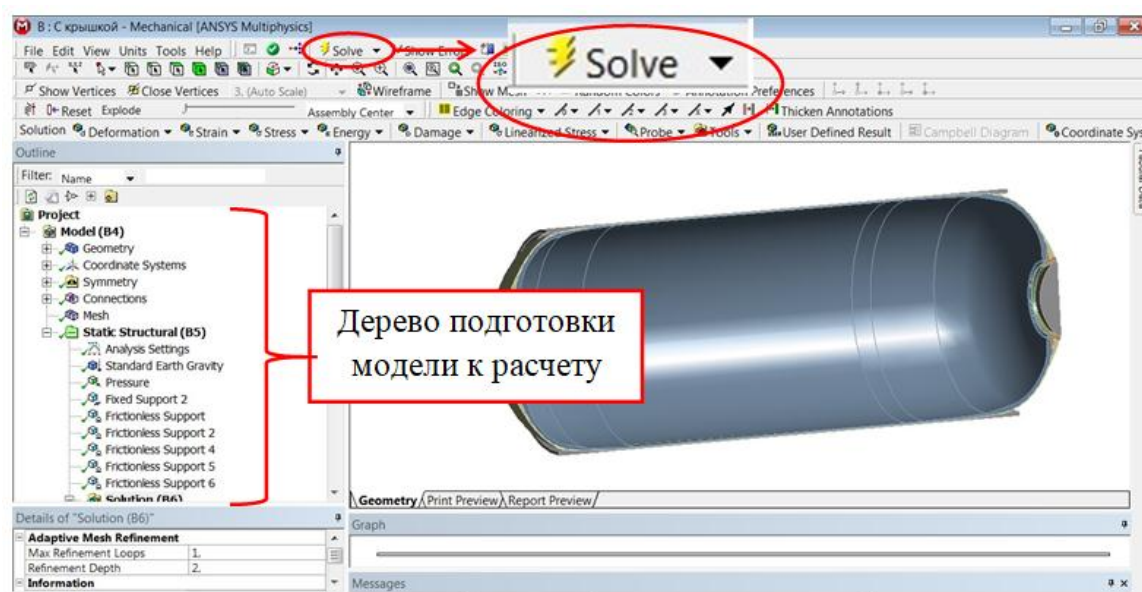


Рисунок 4.11 – Общий вид структуры расчетной модели 1.

Далее, после успешного завершения расчета проводится анализ необходимых параметров. Выбор необходимого параметра для проведения анализа возможен двумя способами:

1 – с помощью *utility menu*, в котором можно выбрать основные параметры из небольшого списка;

2 – с помощью кнопки «*Worksheet*», после нажатия которой откроется полный список всех доступных параметров для проведения анализа (рисунок 4.12).

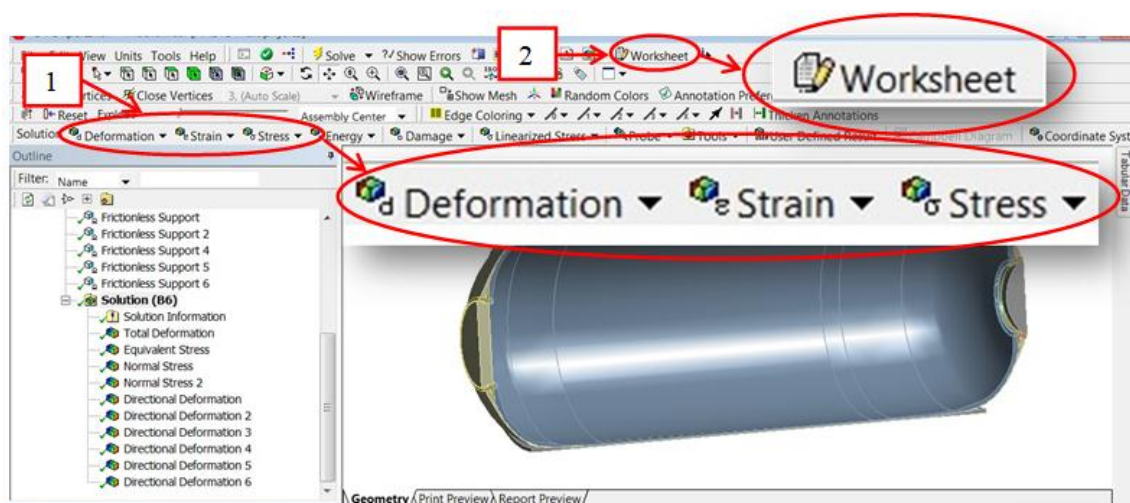
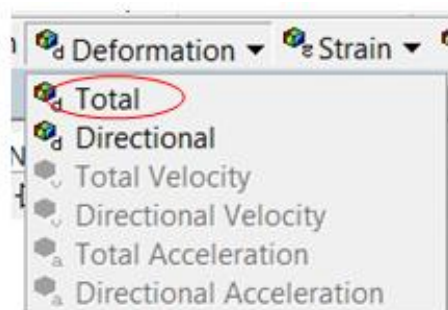


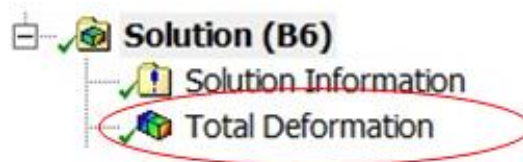
Рисунок 4.12 – Варианты выбора параметров для анализа.

(1 – сокращенный список основных параметров; 2 – полный список всех доступных параметров)

Например, из сокращенного списка на *utility menu* из пункта 1 (рисунок 4.13) можно выбрать параметр «*Deformation*» (Деформации) и из появившегося списка выбрать параметр «*Total*» (Суммарные) (рисунок 4.13а), этот параметр отображается внизу дерева подготовки модели к расчету, под пунктом *Solution* (Решение) (рисунок 4.14б).



а



б

Рисунок 4.13 – Вывод результатов

На этом этапе целесообразно сравнить результаты численного расчета с результатами проведенных испытаний.

На рисунке 4.14 представлена геометрическая модель 2 с более подробной детализацией.

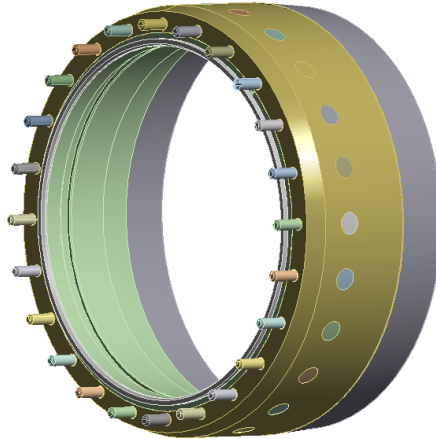


Рисунок 4.14 – Геометрическая модель 2 с более подробной детализацией относительно модели 1 – штифты и шпильки

На рисунке 4.15 представлена схема граничных условий. Данная схема соответствует схеме граничных условий при расчете модели 1 за исключением того, что на границе 1 задается перемещение, которое заменяет отсеченную часть конструкции.

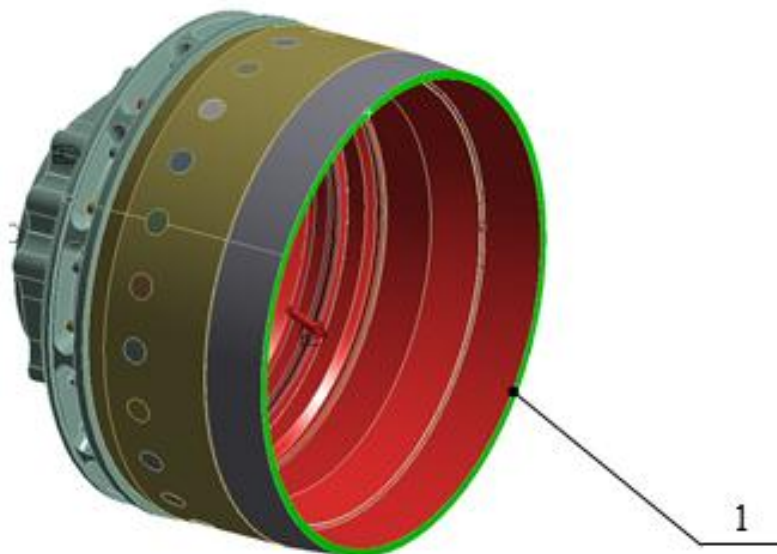


Рисунок 4.15 – Схема граничных условий модели 2
(1 – силы и моменты отсеченной части конструкции)

Получив на втором этапе результаты НДС, переходим к третьему этапу исследования, на котором в модель второго этапа моделируется дефект типа расслоение и оценивается его влияние на прочность конструкции при действии нагрузок (рисунок 4.16).

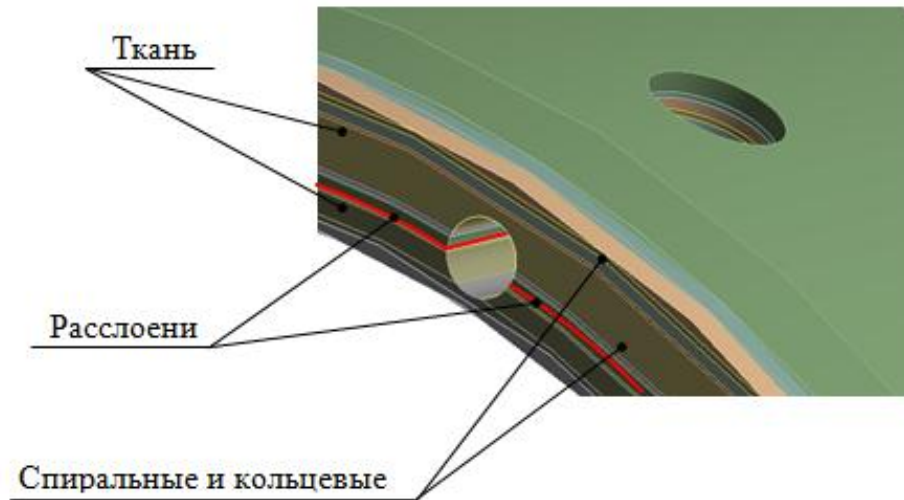


Рис.4.16 – Геометрическая модель с расслоениями

Для оценки НДС на прочность композиционного материала используется критерии максимальных напряжений в исследуемых сегментах в виде соотношений (3.6) и критерий Хашина (3.7), который позволяет определять межслоевую прочность при наличии взаимного влияния нескольких компонент напряжений.

4.2 Расчет эффективных упругих характеристик многослойных пакетов, секторов цилиндрической многослойной конструкции из разнородных материалов

Совместно с ПНИПУ прописаны и верифицированы программные коды на языке *APDL* для расчета эффективных характеристик.

Численный расчет эффективных упругих свойств слоистых пакетов в *ANSYS Workbench* состоит из следующих этапов:

- построение геометрической модели в *ANSYS Workbench* либо импорт готовой модели;
- назначение материалов компонентам геометрической модели;

- назначение ориентации слоев;
- разбиение геометрической модели на КЭ;
- задание граничных условий, исходя из свойств эффективного модуля упругости;
- ввод программного кода *APDL* в *Commands (APDL)* для искомого эффективного модуля.
- запуск выполнения численного расчета.

Численный расчет эффективных упругих свойств начинается с запуска ПК *ANSYS Workbench* и добавления системы анализа *Static Structural* (рисунок 4.17).

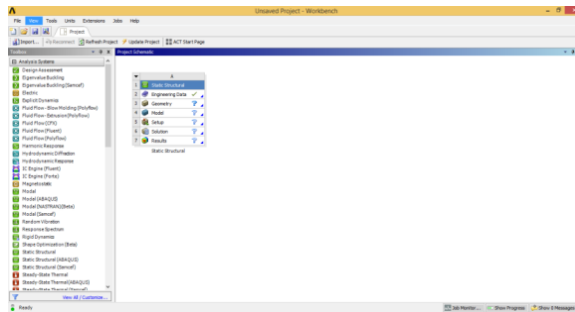


Рисунок 4.17 – Вид окна *ANSYS Workbench* с добавленной системой анализа *Static Structural*

В *Engineering Data Static Structural* выбираются материалы для слоя (рисунок 4.18) пакета, либо, при их отсутствии, добавляются новые.

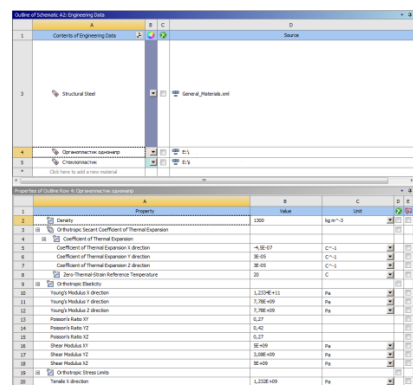


Рисунок 4.18 – Назначение материала для слоя

Для расчета с материалом органопластик эффективные упругие свойства слоя представлены в таблице 4.1. Если свойства на уровне слоя не известны и имеются физико- механические свойства связующего и волокна, то можно рассчитать эффективные свойства слоя.

Далее вводятся характеристики волокна и связующего как ортотропного материала в 3-х направлениях (рисунок 4.19).

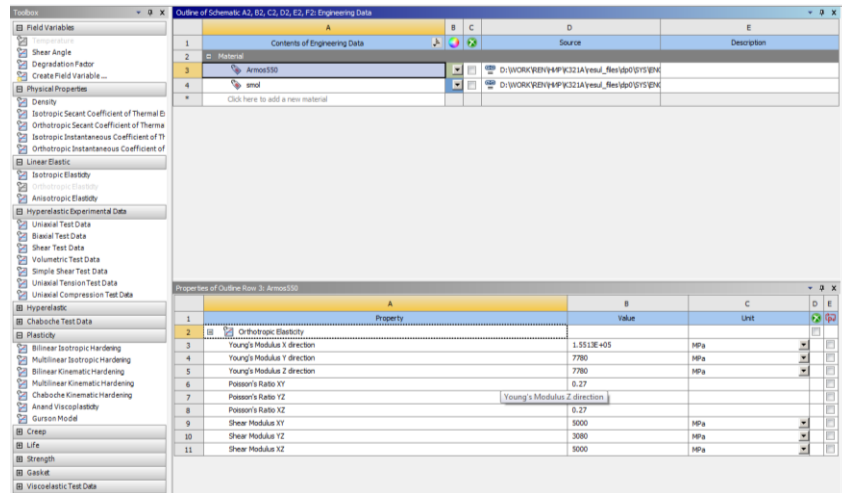


Рисунок 4.19 – Ввод свойств волокна и связующего

Строится элементарная ячейка из волокна и связующего (рисунок 4.20).

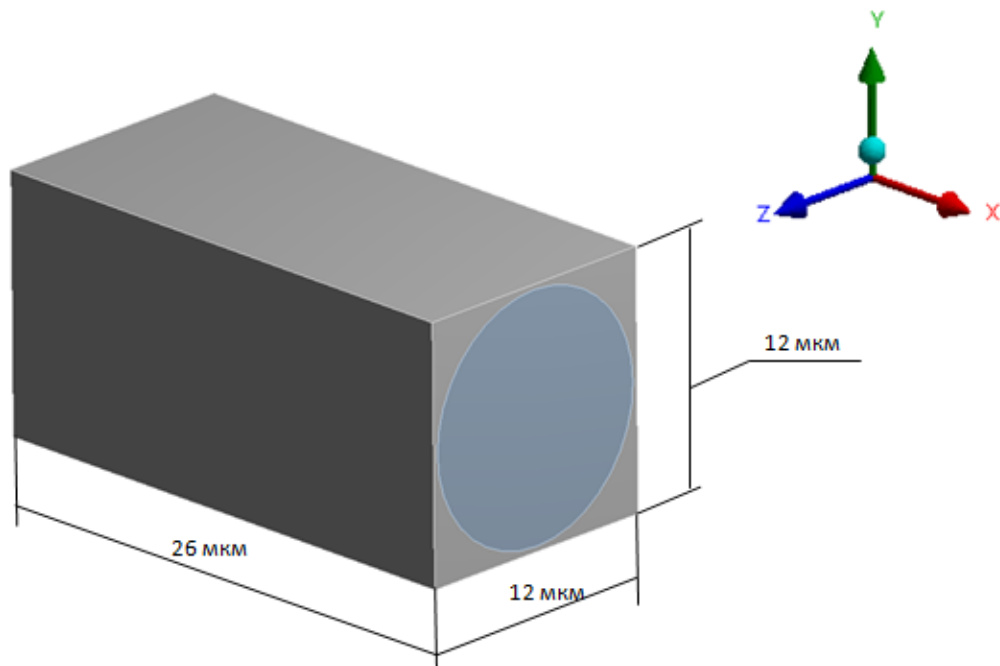


Рисунок 4.20 – Элементарная ячейка из волокна и связующего

Назначаются контактные граничные условия согласно рисунку 4.21 и таблицы 4.2. По умолчанию в *ANSYS Workbench* автоматически создаются контакты между телами.

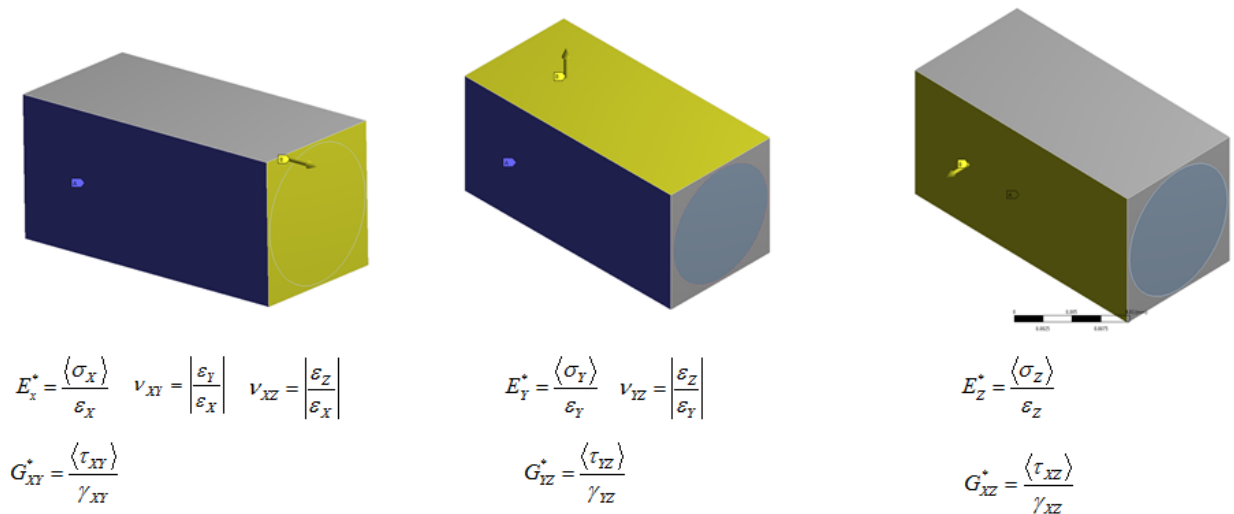


Рисунок 4.21 – Расчетные схемы

Одним из последних и важных этапов при численном расчете эффективных упругих свойств является включение в расчет разработанного ПНИПУ кода на языке *APDL*. В модуле запрограммированы вычисления эффективных характеристик методом осреднения по объему. Для добавления рассматриваемого модуля проводятся следующие действия в дереве модели: *Static Structural* → *Solution* → *Insert* → *Commands* (рисунок 4.22).

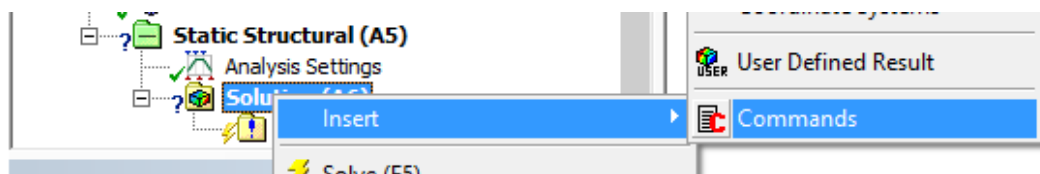


Рисунок 4.22 – Добавление модуля для расчета эффективных свойств

Далее прописывается программный код *APDL* в *Commands (APDL)* (рисунок 4.23) для искомого эффективного модуля.

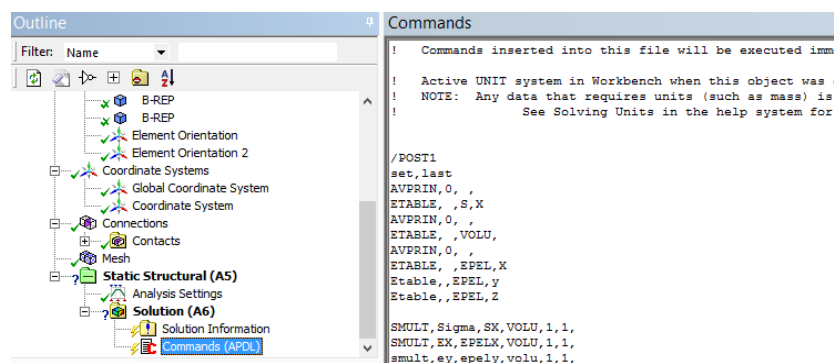


Рисунок 4.23 – Программный код APDL в расчете

После проведения всех вышеперечисленных действий запускается численный расчет. По окончании расчета проект сохраняется в выбранной директории.

Для вывода значений эффективных упругих характеристик (ЭУХ) непосредственно в Ansys Workbench Mechanical необходимо перейти в *Details of "Commands (APDL)*. Из этого списка параметров необходимо найти пункт *Output Search Prefix* и выставить для него значение *Eff_*. Полученные результаты ЭУХ будут выведены в *Details of "Commands (APDL)* в пункте *Results* (рисунок 4.24) после проведения расчета.

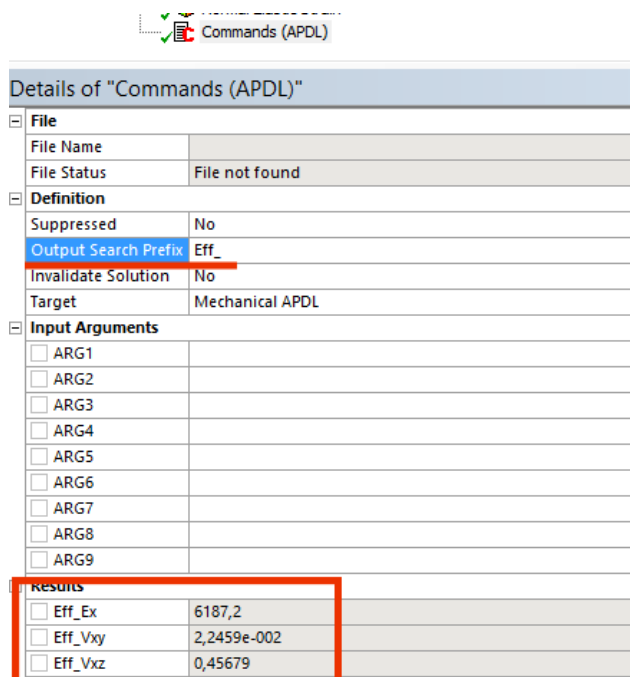


Рисунок 4.24 – Выведенные значения ЭУХ

Таблица 4.1 – Эффективные упругие свойства слоя

Материал	E_x , ГПа	E_y , ГПа	E_z , ГПа	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} , ГПа	G_{yz} , ГПа	G_{xz} , ГПа
Органопластик	113,1	6,1	6,1	0,29	0,46	0,29	2,6	2,0	2,6

Следующим шагом является создание геометрической модели в *Geometry Static Structural*. (рисунок 4.25).

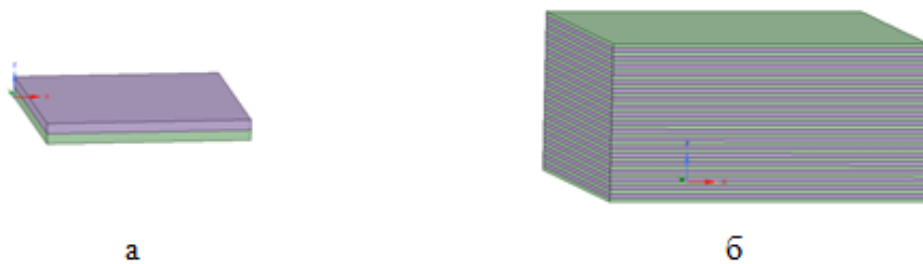


Рисунок 4.25 – Слоистый пакет из органопластика с разными углами укладки: а – два слоя, б – сорок слоев

Построенные слоистые модели из органопластика имеют следующие геометрические характеристики: толщина кольцевого слоя - 0,32 мм, спирального – 0,7 мм, для девятислойного - длина и ширина - 10 мм, для двенадцати- и пятнадцати слойного - длина и ширина - 20 мм, для тридцати девятислойного - длина и ширина - 40 мм.

Далее переходим в модуль *Model* в *Static Structural* и назначаем материалы (рисунок 4.26) для слоев, полученные при расчете эффективных свойств на микроуровне.

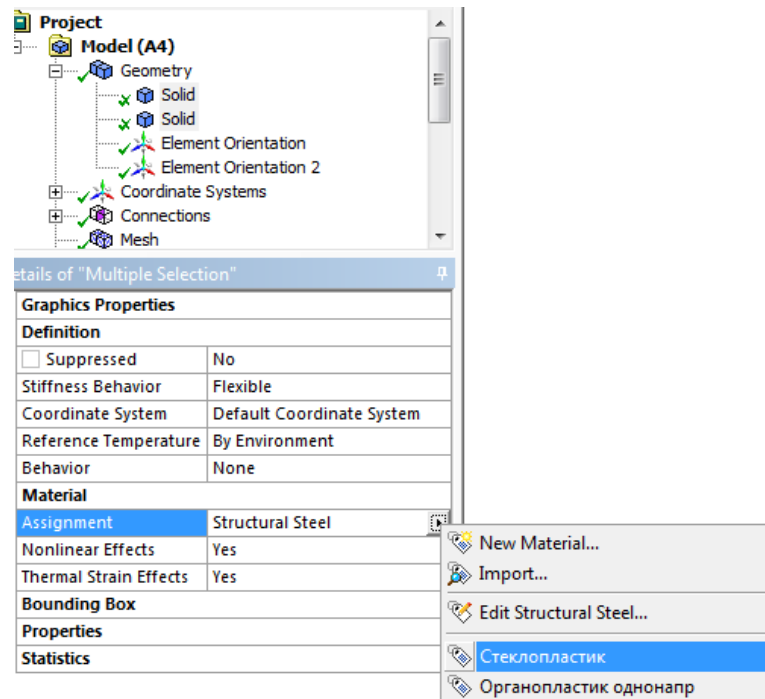


Рисунок 4.26 – Назначение материалов для стеклопластика и органопластика

При численном расчете эффективных свойств для получения значений эффективных модулей, необходимо установить ориентацию армирования слоя. Чтобы изменить ориентацию, следует повернуть систему координат относительно оси на нужный угол, перпендикулярно плоскости укладки слоев. В данном случае поворот будет совершаться относительно оси Z .

Поворот СК задается следующим образом:

- добавляется в дерево модели: *Geometry* → *Insert* → *Element Orientation* (рисунок 4.27).

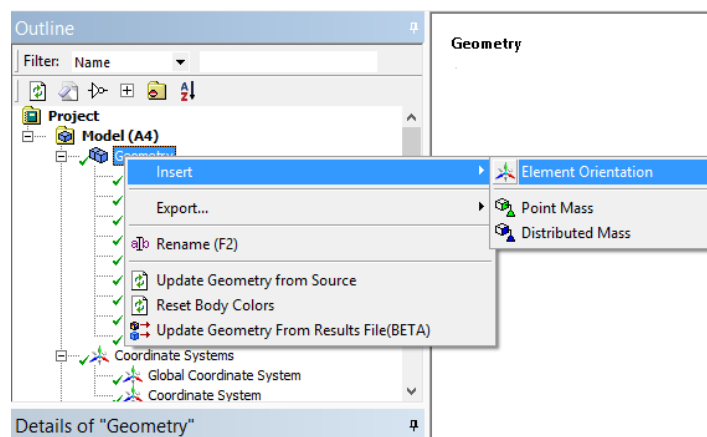
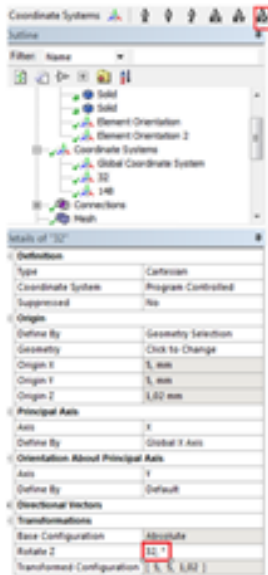
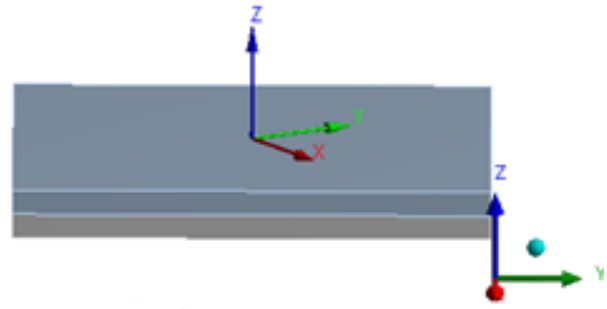


Рисунок 4.27 – Добавление ориентации КЭ в дерево модели

- в верхнем меню выбирается поворот относительно оси Z (RZ) и в *Details of "Coordinate System"* в пункте *Rotate Z* задается значение угла поворота в градусах (рисунок 4.28а). После чего ориентация КЭ поворачивается на заданный угол (рисунок 4.28б).



а)



б)

Рисунок 4.28 – Поворот СК (а) и ориентированная СК
в геометрической модели (б)

Таким же способом устанавливается ориентация слоев с другим углом армирования.

Далее назначаются контактные граничные условия. По умолчанию в *ANSYS Workbench* автоматически создаются контакты между телами. Чтобы исключить лишние контакты слоев между собой, необходимо назначить допуск для контактирующих тел. Значение которого лежит в интервале: не более половины минимального зазора (между слоями) в геометрической модели, но не менее 10 % от него.

Граничные условия для геометрической модели слоистого пакета назначаются согласно рисунку 4.28 и таблице 4.2, исходя из искомого эффективного модуля.

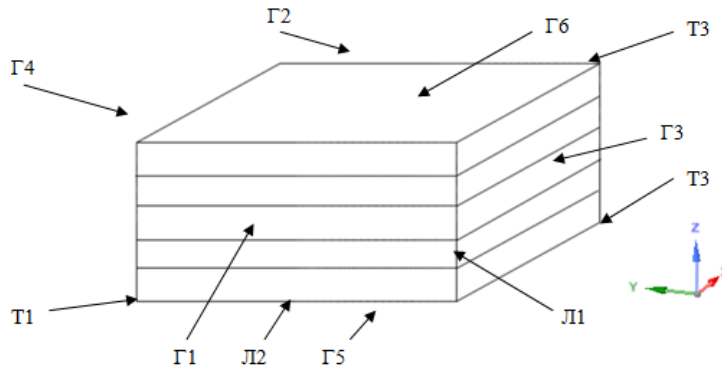


Рисунок 4.28 – Схема граничных условий

Таблица 4.2 – Граничные условия

Параметр	Г1	Г2	Г3	Г4	Г5	Г6
E_x, v_{xy}	$u_x = 0,$ $\tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$	$u_x = u_x^0,$ $\tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$	$u_y = 0,$ $\tau_{yx} = \tau_{yz} = 0$	$\sigma_{yy} = \tau_{yx} =$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_{zz} = \tau_{zx} =$ $\tau_{zy} = 0$	$\sigma_{zz} = \tau_{zx} =$ $\tau_{zy} = 0$
E_y, v_{yz}	$u_x = 0,$ $\tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$	$\sigma_{xx} = \tau_{xy} =$ $\tau_{xz} = 0$	$u_y = 0,$ $\tau_{yx} = \tau_{yz} = 0$	$u_y = u_y^0,$ $\tau_{yx} = \tau_{yz} = 0$	$\sigma_{zz} = \tau_{zx} =$ $\tau_{zy} = 0$	$\sigma_{zz} = \tau_{zx} =$ $\tau_{zy} = 0$
E_z, v_{zx}	$u_x = 0,$ $\tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$	$\sigma_{xx} = \tau_{xy} =$ $\tau_{xz} = 0$	$\sigma_{yy} = \tau_{yx} =$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_{yy} = \tau_{yx} =$ $\tau_{yz} = 0$	$u_z = 0,$ $\tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$	$u_z = u_z^0,$ $\tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$
G_{xy}	$u_x = 0,$ $u_x = 0,$ $\tau_{xy} = \tau_{xz} = 0$	$u_x = 0,$ $u_y = u_y^0,$ $\tau_{xz} = 0$	$\sigma_{yy} = \tau_{yx} =$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_{yy} = \tau_{yx} =$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_{zz} = \tau_{zx} =$ $\tau_{zy} = 0$	$\sigma_{zz} = \tau_{zx} =$ $\tau_{zy} = 0$
G_{yz}	$\sigma_{xx} = \tau_{xy} =$ $\tau_{xz} = 0$	$\sigma_{xx} = \tau_{xy} =$ $\tau_{xz} = 0$	$\sigma_{yy} = \tau_{yx} =$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_{yy} = \tau_{yx} =$ $\tau_{yz} = 0$	$u_x = 0,$ $u_z = 0,$ $\tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$	$u_x = u_x^0,$ $u_z = 0,$ $\tau_{zy} = 0$
G_{zx}	$\sigma_{xx} = \tau_{xy} =$ $\tau_{xz} = 0$	$\sigma_{xx} = \tau_{xy} =$ $\tau_{xz} = 0$	$\sigma_{yy} = \tau_{yx} =$ $\tau_{yz} = 0$	$\sigma_{yy} = \tau_{yx} =$ $\tau_{yz} = 0$	$u_y = 0,$ $u_z = 0,$ $\tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$	$u_y = u_y^0,$ $u_z = 0,$ $\tau_{zx} = 0$

Выводы по главе 4

1. Разработана методика диагностики технического состояния композитных корпусов РДТТ при наличии в них межслоевых расслоений в конструкции.

2. При разработке методики расчета эффективных упругих характеристик секторов силовой оболочки были выявлены значимые факторы, влияющие на точность расчета, а именно: реальные свойства компонентов, их объемное содержание по направлениям, а также учет анизотропии свойств в рамках расчетной модели.

3. Разработанный алгоритм прогнозирования прочности НДС и жесткости крупногабаритной многослойной цилиндрической конструкции из КМ обладает хорошими сервисными возможностями и включает в себя: построение твердотельных и сеточных моделей; прогнозирование и назначение физико-механических свойств композиционного материала с различной схемой намотки; назначение граничных условий и контактирующих областей; обработку полученных результатов и оценку статической прочности расчетной области с дефектом типа «расслоение».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании проведенного анализа несплошностей в изготовленных корпусах определены площади распределения несплошностей для заднего и переднего узлов стыка, дающие исходную информацию для постановки задачи математического моделирования прочностного состояния корпуса двигателя и оценки статической прочности на основе анализа НДС композитных конструкций с учетом несплошностей.

2. С целью исследования влияния расслоений между слоями на деформационные и прочностные свойства КМ изготовлены кольцевые образцы с фторопластовой пленкой, имитирующей расслоения, и по стандартной методике проведены испытания этих образцов, которые подтвердили отрицательное влияние расслоений, наибольшее снижение предела прочности материала получено до 17 % (при приложении нагрузки под углом 45° относительно периферии расслоения). Для характеристики уровня имеющихся расслоений в конструкции и в испытываемых образцах введен безразмерный коэффициент несплошности k .

3. Разработана математическая модель и программное обеспечение на основе метода конечных элементов, позволяющая проводить трёхмерный анализ напряженно-деформированного состояния композитных оболочек, составленных из разнородных композиционных структур и имеющих межслойные расслоения.

4. Анализом НДС показано, что наиболее опасными для конструкции являются межслойные и сдвиговые напряжения в плоскости слоев, локализованные в малых зонах в окрестности штифтового соединения. Корпус, нагруженный статическим давлением остаётся работоспособным, если область расслоения в многослойной композиционной оболочке не более длины от стыковочного торца отверстия под штифт до края оболочки. Межслоевое расслоение композита корпуса в зоне резьбового соединения повышает уровень напряжений среза, действующих в тканевом слое (выше допустимого уровня), что приводит к перераспределению нагрузки между кольцевыми и спиральными

слоями и снижению несущей способности рассматриваемой зоны примерно в 2 раза.

5. Разработана методика диагностики технического состояния композитных корпусов РДТТ при наличии в них межслоевых расслоений в конструкции, которая внедрена в расчётно-методическую базу ПАО НПО «Искра», а также в учебный процесс подготовки специалистов по специальности «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (специализация: «Проектирование ракетных двигателей на твердом топливе») ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

Разработанный алгоритм прогнозирования прочности НДС и жесткости крупногабаритной многослойной цилиндрической конструкции из КМ обладает хорошими сервисными возможностями и включает в себя: построение твердотельных и сеточных моделей; прогнозирование и назначение физико-механических свойств композиционного материала с различной схемой намотки; назначение граничных условий и контактирующих областей; обработку полученных результатов и оценку статической прочности расчетной области с дефектом типа «расслоение».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

β – коэффициент;

ε – деформация;

ε_{θ} – окружная деформация;

$\Delta\varepsilon$ – приращение относительной деформации;

σ – окружные напряжения [МПа];

σ_{τ} – предел текучести [МПа];

$\sigma_{\theta_{\text{пл}}}$ – предел прочности в окружном направлении [МПа];

$\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности [МПа];

$\bar{\sigma}$ – относительный предел прочности [МПа];

$\tau_{\text{ср}}$ – разрушающие напряжения при срезе [МПа];

d – диаметр резьбы [мм];

E – модуль упругости [ГПа];

E_{θ} – модуль упругости в окружном направлении [ГПа];

F – осевая сила, нагрузка [Н];

$F_{\text{пл}}$ – разрушающая нагрузка [Н];

ΔF – приращение нагрузки [Н];

f – коэффициент трения в резьбе;

H – высота рабочих витков;

k – коэффициент несплошности;

k_m – коэффициент;

l – длина измерительной базы [мм];

Δl – приращение длины измерительной базы [мм];

M – момент затяжки [Н·мм];

n – количество слоев;

$P_{\text{раз}}$ – давление разрушения [МПа];

Q – усилие от момента затяжки [Н];

S – площадь поперечного сечения образца [мм²];

$S_{\text{общ}}$ – площадь срединной поверхности образца [мм²];

$S_{\text{расслоен}}$ – площадь поверхности расслоения [мм²];

- ЗУС – задний узел стыка;
- КЛТР – коэффициент линейного теплового расширения;
- КМ – композиционный материал;
- КЭ – конечный элемент;
- КЭА – конечно-элементный анализ;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- НДС – напряженно-деформированное состояние;
- ПКМ – полимерный композиционный материал;
- ПУЗ – передний узел стыка;
- РДТТ – твердотопливный ракетный двигатель;
- РКТ – ракетно-космическая техника;
- САПР – система автоматизированного проектирования;
- ФМХ – физико-математические характеристики;
- ШШС – штифто-шпилечное соединение;
- ЭУХ – эффективные упругие характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anoshkin, A.N. Numerical prediction of the elastic characteristics of spatially reinforced composite materials / A.N. Anoshkin, P.V. Pisarev, D.A. Ermakov, K.A. Maksimova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 286 (2017) 012029 doi:10.1088/1757-899X/286/1/012029.
2. Bar-Cohen, Y. Experimental enhancements of leaky Lamb wave dispersion data acquisition and implementation challenges to NDT composites / Y. Bar-Cohen, Lih S-S. // Materials Evaluation. – 2000. – Vol. 58 No.6 – P. 801-809.
3. Budiaushy, B. Theory of buckling and post buckling of elastic structures / B. Budiaushy // Advances in Applied Mechanics. – 1974. – Vol. 14. – P. 1 – 65.
4. Cawley, P. Defect types and NDT for composites bonded joints / P. Cawley, R. Adams // Materials Science and Technology. – 1989. – Vol. 5. – P. 406-447.
5. Chai, H. One dimensional modeling of failure in laminated plates by delamination buckling / H. Chai, C.D. Babcock, W.G. Knous // Intonation Journal of Solids and structures. – 1981. – Vol. 14. – № 11. – P. 1069 – 1083.
6. Chan, W.S. A study on the effects of the 90⁰ plyonmatrix cracks in composite laminates / W.S. Chan, A.S. Wang // AIAA/ ASME/ASCE/AHC structures, structural: Dynamics and materials conference 27 collection of technical papers. Lanantonio (USA). – 1986. – Vol. 1. – P. 689 – 694.
7. Chen, H.P. Postbuckling Behavior of a Thick Plate / H.P. Chen, J.L. Doong // AIAA Journal. – 1983. – Vol. 21. – № 8. – P. 1157 – 1161.
8. Composite Materials Handbook-MIL 17: VOLUME 1. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials: Department of defense handbook, – 2002. – p.586.
9. Kim, S. Efficient higher-order shell theory for laminated composites with multiple delaminations / S. Kim, M. Cho // AIAA Journal. – 2003. – Vol. 41. – №5. – P. 941-950.
10. Kulkarni, S.V. Buckling of partially debonded Layered Cylingrical shells / S.V. Kulkarni, D. Frederick // AJAA Report. – 1973. – №73. — P. 21-30.

11. Stone, R. A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates / R. Stone, K. Krishnamurtli // Int. – J Mach Tools Manuf. – 1996.
12. Way, S. Bending of Circular Plates with Large Deflection / S. Way // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. – 1934. – Vol. 23. – №56. – P. 627-636.
13. Wong, T.L. An analysis of delamination in drilling composite materials / T.L. Wong, S.M. Wu, G.M. Croy // In: 14 th National SAMPE technology conference. – Atlanta, GA, USA, – 1982.
14. Абовский, Н.П. Вариационные принципы теории упругости и теории оболочек / Н.П. Абовский, Н.П. Андреев, А.П. Деруга – М.: Наука. –1978. – 287 с.
15. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М. : Наука. –1976. – 280 с.
16. Алфутов, Н.А. Многослойные композитные оболочки вращения / Н.А. Алфутов, Б.Г. Попов // В кн. : Композиционные материалы: справочник под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. - М. : Машиностроение. – 1990. – С. 376 - 404.
17. Алфутов, Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем : учеб. пособие / Н.А. Алфутов. – Москва : Машиностроение. – 1991. – 336 с.
18. Аношкин, А.Н. Микромеханический анализ неупругого деформирования однонаправленных волокнистых композитов при многоосном нагружении и сдвиге // Механика композитных материалов. –2003. – Т 39. – № 5. – С. 575-586.
19. Аношкин, А.Н. Модели нелинейного деформирования и разрушения композиционных материалов и конструкций / А.Н. Аношкин // Вестник ПГТУ. Динамика и прочность машин.– Пермь: ПГТУ. – 2001 – № 2. – С. 11-19.
20. Аношкин, А.Н. Расчет НДС и оценка прочности композитного фланца стеклопластикового кожуха авиационного газотурбинного двигателя / А.Н. Аношкин, М.В. Рудаков, И.С. Страумит, Е.Н. Шустова // Вестник Уфимского

- государственного авиационного технического университета. – 2011. –Т.15. – №1(41). – С. 67 – 75.
21. Аношкин, А.Н. Прогнозирование несущей способности композитных фланцев корпусных деталей авиадвигателей / А.Н. Аношкин, А.А. Ташкинов – Пермь. Перм. гос. техн. ун-т. – 1998 – 101 с.
 22. Аношкин, А.Н. Расчет напряженно-деформированного состояния фланца из полимерных композиционных материалов с дефектом в виде расслоения / А.Н. Аношкин, Д.И. Федоровцев, П.В. Писарев, В.М. Осокин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – Пермь. – 2015. – №43. – С. 116 – 130.
 23. Аношкин, А.Н. Расчет технологических напряжений в процессе производства бипластмассовых труб / А. Н. Аношкин, А. А. Ташкинов, А. Ф. Ларионов, А. Б. Поспелов // Вестник ПГТУ. Полимерные материалы. – Пермь: ПГТУ. – 1997. – № 3. – С.24-32.
 24. Ахундов, В.М. Каркасная теория жестких и мягких композитов с неискривленными и искривленными структурами. Инвариантное описание / В.М. Ахундов // Механика композиционных материалов и конструкций. - 2000. - Т. 6. – № 2. - С. 275 - 293.
 25. Багмутов, В.П. Несущая способность криволинейных труб из армированных пластиков при статическом нагружении / В.П. Багмутов, В.Н. Тышкевич, В.Б. Светличная // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2004. – № 4. – С. 71--73.
 26. Багмутов, В.П. Расчет и рациональное проектирование криволинейных труб из армированных пластиков : [монография] / В.П. Багмутов, В.Н. Тышкевич, В.Б. Светличная. –Волгоград : ВолгГТУ. – 2008. – 157 с.
 27. Басов К.А. ANSYS для конструкторов / К.А. Басов. - Москва : ДМК Пресс. – 2016. – 247 с. : ил. - (Проектирование) ISBN 978-5-9706037-2-7.
 28. Бегеев, Т.К. Исследование контактного взаимодействия в механических и клеевых соединениях / Т.К. Бегеев, В.И. Гришин, В.Б. Литвинов // Ученые записки ЦАГИ. – 1992. – Т. 23. – № 1. – С. 104-108.

29. Безмельницын А.В. Многомасштабное моделирование и анализ механизма возникновения технологических межслойных напряжений в толстостенных кольцах из стеклопластика / А.В. Безмельницын, С.Б. Сапожников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 2. – С. 5-22.
30. Белкин, А.Е. Расчет пластин методом конечных элементов / А.Е. Белкин, С. С. Гаврюшин - М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2003. – 151 с.
31. Бидерман, В.Л. Пластинки и оболочки из ориентированных стеклопластиков : справочник в 3т / В.Л. Бидерман // В кн : Прочность, устойчивость, колебания. под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. - М. : Машиностроение. – 1968. – Т.2. – С.211 – 244.
32. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин. Справочник / И.А. Биргер, Е.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич - М.:Машиностроение. – 1993.
33. Болотин, В.В. Влияние технологических факторов на механическую надежность конструкций из композитов / В.В. Болотин // Механика полимеров. – 1972. – № 3. – С.529-540.
34. Болотин, В.В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю. Н. Новичков. - М. : Машиностроение. – 1980. – 376 с.
35. Болотин, В.В. Образование остаточных напряжений в изделиях из слоистых композитов в процессе отверждения / В.В. Болотин, А.Н. Воронцов // Механика полимеров. –1976. –№5. – С.790-795.
36. Болотин, В.В. Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития : учебник / В.В. Болотин, И.И. Гольденблат, А.Ф. Смирнов. – 2-е изд. – Москва : Стройиздат. – 1972. – 191 с.
37. Болотин, В.В. Устойчивость сжатых элементов с дефектами типа расслоений / В.В. Болотин, З.Х. Зебельян, Л.А. Курзин // Проблемы прочности. – 1980. – № 7. – С. 3 – 8.
38. Болотин, В.В. Устойчивость упругих сферических оболочек с расслоениями / В.В. Болотин, З.Х. Зебельян // Расчеты на прочность. – Москва. – 1981. – вып.22. – С. 150-165.

39. Бохоева, Л.А. Определение критических нагрузок с помощью энергетического критерия устойчивости для локального круглого дефекта /Л.А. Бохоева, В.Е. Рогов, А.С. Чермошенцева // Системы. Методы. Технологии. – Братск : Братский государственный университет. – 2014. – №4 (24). – С. 32 – 37.
40. Бохоева, Л.А. Теоретическая оценка максимальных размеров безопасных дефектов типа отслоений / Л.А. Бохоева, В.Б. Антохонов, Б.И. Зангеев //Материалы Международной научной конференции «Проблемы механики современных машин». - Улан-Удэ. – 2000. – С. 14 – 15.
41. Бохоева, Л.А. Влияние дефектов типа отслоений в слоистых пластинах на величину критической нагрузки // Вестник БГУ, Улан-Удэ. – 2005. – Вып.5. – С. – 243 – 264.
42. Бохоева, Л.А. Испытания на прочность кольцевых образцов из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами / Л.А. Бохоева, А.Г. Пнев, А.С. Чермошенцева //Вестник БГУ, Улан-Удэ. – 2011. – №9. – с.230 – 236.
43. Будилов, И.Н. Расчет силовых и энергетических параметров разрушения в области вершины трещины в обечайке теплообменного аппарата / И.Н. Будилов // Вестник УГАТУ. – Уфа. – 2016. – Т.20. – № 2 (72). – С. 3 – 10.
44. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / И.М. Буланов, В.В. Воробей – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1998. – 514 с.
45. Бульбович, Р.В. Расчет напряженно-деформированного состояния тела из упругого ортотропного материала с помощью метода конечных элементов / Р.В. Бульбович, В.В. Павлоградский, П.П. Еременко // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 40. – С. 92 – 106.
46. Бульбович Р.В. Численно-экспериментальное исследование многослойных цилиндрических корпусов с локальными расслоениями / Р.В. Бульбович, А.Б. Ознобишин, Е.Н. Рогожникова // Вестник ПНИПУ Аэрокосмическая техника. – 2020. – №63. – С. 40-51.

47. Буров, А.Е. Модели разрушения волокнистых композиционных материалов / А.Е. Буров // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева". – 2008. – № 3 (20). – С. 133 – 138.
48. Быков, Е.В. Расчет многослойных оболочечных конструкций с учетом деформаций поперечных сдвигов / Е.В. Быков, Б.Г. Попов // Расчеты на прочность. – 1989. – Вып.30. – С. 66 – 87.
49. Ванг, А. Анализ разрушения через межслойное растрескивание / А. Ванг // В сб. : Межслойные эффекты в композиционных материалах. Под ред. Н. Пэйгано. – М. : Мир. – 1993. – С. 88 – 136.
50. Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М. : Машиностроение. – 1988. – 272 с.
51. Вашуков Ю.А. Анализ и моделирование напряженно-деформированного состояния отверстий с подкреплением в листовых деталях из композиционных материалов / Ю.А. Вашуков, Е.А. Климов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 89-104.
52. Веттегрень, В.И. Физические основы кинетики разрушения материалов / В.И. Веттегрень, С.О. Лазарев, В.А. Петров. – Л. : Изд. ФТИ. – 1989. – 230 с.
53. Викторов, Е.Г. Подрастание и излом отслоений в композитах при сжатии / Е.Г. Викторов // Механика материалов и конструкций. – Москва : Изд-во МЭИ. – 1982. – С. 36 – 40.
54. Виноградов, Г.В. Реология полимеров : [монография] / Г.В. Виноградов, А.Я. Малкин. – М. : Химия. – 1977. – 440 с.
55. Воробей, В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композиционных конструкций / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск : Наука. – 2006. – С. 190.

56. Воробей, В.В. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей / В.В. Воробей, В.Б. Маркин - Новосибирск: Наука.– 2003. – 164с.
57. Ву, Э.М. Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред / Э.М. Ву // В кн. : Композиционные материалы. – М. : Мир. – 1978. –Т. 2. – С. 401 – 491.
58. Гагауз, Ф.М. Проблемы технологии формирования соединительных узлов конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов / Ф.М. Гагауз // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сборник научных трудов. ХАИ. – 2012. – № 4 (72). – С. 15-20.
59. Голушко, С.К. Построение проектов армированных оболочечных конструкций минимального веса / С.К. Голушко, Г.В. Немировский // Вычислительные проблемы механики. – Красноярск. – 1989. – С.117 – 130.
60. Гольденблат, И.И. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов / И.И. Гольденблат, В.А. Копнов. -М. : Машиностроение. – 1968. – 192 с.
61. Гольденблат, И.И. Прочность стеклопластиков при сложном напряженном состоянии / И.И. Гольденблат, В.А. Копнов // Механика полимеров. – 1965. – №2. – С. 70 – 78.
62. Григолюк, Э.И. Развитие общего направления в теории многослойных оболочек / Э.И. Григолюк, Г.М. Куликов // Механика композитных материалов. – 1988. – №2. – С. 287 – 298.
63. Гриневич Д.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) / Д.В. Гриневич, Н.О. Яковлев, А.В. Славин // Труды ВИАМ. – 2019. – № 7(79). – С. 92 – 111. – DOI 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
64. Дамдинов, Т.А. Устойчивость и рост дефектов типа отслоений в пластинах из композиционных материалов: автореф. дис. канд. техн. наук 01.02.06/ Дамдинов Тимур Абрамович – Иркутск. – 2007. – 19 с.
65. Дементьев, И.И. Метод снижения остаточных напряжений в композитных элементах конструкций космических аппаратов / И.И. Дементьев, А.Н.

- Устинов // Альманах современной науки и образования. – Тамбов : Общество с ограниченной ответственностью Издательство "Грамота". – 2017. – № 6 (119). – С. 27 – 31.
66. Елпатьевский, А.Н., Васильев В.В. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов / А.Н. Елпатьевский, В.В. Васильев. – М.: Машиностроение. – 1972. – 168 с.
67. Еременко, С.Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел / С.Ю. Еременко. – Харьков : Изд-во "Основа" при ХГУ. – 1991. – 272 с.
68. Ершова, А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния системы «корпус - резиновая прослойка - заряд» / А.А. Ершова, А.Б. Ознобишин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 35. – С. 29-31.
69. Зиновьев, П.А. Предельные возможности многослойных композитных структур / П.А. Зиновьев, А.А. Смердов // Известия РАН. Механика твердого тела. – 1994. – Т.1. – С. 7 – 17.
70. Зиновьев, П.А. Прочностные, термоупругие и диссипативные характеристики композитов / П.А. Зиновьев // В кн.: Композиционные материалы : справочник под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение. – 1990. – С. 232 – 267
71. Калинин, В.А. Намотанные стеклопластики / В.А. Калинин, М.С. Макаров – Москва : Химия. – 1986. – 272 с.
72. Карташова, Е.Д. Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов / Е.Д. Карташова, А.Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 79 – 89.
73. Касимов, А.Т. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния слоистых пластинчатых конструкций на основе уточненной теории изгиба / А.Т. Касимов, А.К. Кожас, Ю.Н. Пчельникова, Б. А. Касимов.

74. Кесельман, Г.Д. Расчет на прочность трехслойной конструкции и закладных элементов / Г.Д. Кесельман, И.И. Зимин, Е.Н. Данилов [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. – № 1. – С. 6 – 15.
75. Ким, Р. Экспериментальное наблюдение расслоения у свободных кромок / Р. Ким // В сб. : Межслойные эффекты в композиционных материалах. – М. : Мир. – 1993. – С. 137 – 192.
76. Киркач, А.Б. Проблемы прочности болтовых соединений на основе слоистых композиционных пластиков / А.Б. Киркач // Харьков. НТУ «ХПИ». – 2011.
77. Классификатор методов и средств неразрушающего контроля конструкций из полимерных композитных материалов : сб. науч. тр. / И. М. Круглянский и др. – Москва : МАТИ им К.Э. Циалковского. – 2003. – Вып. 6(78). – С. 222 – 226.
78. Комаров В.А. Цифровое проектирование терморазмеростабильных конструкций из слоистого углепластика / В.А. Комаров, Е.А. Кишов, О.Г. Лайкова, А.А. Павлов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Т. 20. – № 1. – С. 75 – 86.
79. Комков, М.А. Расчет параметров намотки композитных оболочек цилиндрических баллонов и корпусов двигателей / М.А. Комков, В.А. Тарасов // М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2007. – 24 с.
80. Композиционные материалы: справочник / В.В. Василев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин [и др.]; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение. – 1990. – 510 с.
81. Корнев, Д. В. Исследование НДС многослойных элементов ЖРД с учетом физико-механического поведения адгезионной прослойки на стыках металл – композит / Д.В. Корнев // Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Том 1. – М.: МФТИ. – 2009. – 207 с.
82. Кочнева, Н.М. Применение феноменологической нелинейной модели для описания особенностей механического поведения дисперсно-

- высоконаполненных полимеров / Н.М. Кочнева, А.В. Гуляев. // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – Пермь : ПНИПУ. – 2015 – С. 75 – 86.
83. Кравцов В.А. Конечно-элементные модели слоистого композиционного материала / В.А. Кравцов // Вестник Московского авиационного института. – Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – 2009. – Т. 16. – № 6. – С. 6.
84. Кузьмин, А.С. Нелинейная теория многослойных оболочек вращения переменной толщины / А.С. Кузьмин, Ю.Н. Новичков // XIII Всесоюзная конференция по теории пластин и оболочек. – Таллин. – 1983. – Ч.3. – С. 113 – 118.
85. Куимова, Е.В. Численное прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленного волокнистого композита с вязкоупругими компонентами / Е.В. Куимова, Н.А. Труфанов // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. – 2009 №4(70). – С 129 – 148.
86. Лавров, Л.Н. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе / Л.Н. Лавров, М.И. Соколовский, А.А. Болотов, В.И. Гапаненко – Москва : Машиностроение. – 1993. – 215 с.
87. Лазарев, С.О. Длительная прочность изделий из высокоэластических материалов при сжатии / С.О. Лазарев, И.М. Ковалев // Каучук и резина. – 1989. – №3. – С. 22 – 25.
88. Лупкин, Б.В. Влияние технологических параметров процесса сверления на статическую прочность болтовых соединений ПКМ. / Б.В. Лупкин, О.В. Мамлюк, А.И. Дранык, В.С. Петропавловский, А.С. Касс // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. – №60. – с 30 – 41.
89. Люкшин, Б.А. Влияние свойств межфазного слоя на напряженно-деформированное состояние полимерного композита в окрестности включения / Б.А. Люкшин, П.А. Люкшин // Механика композиционных материалов и конструкций. – Москва : Институт прикладной механики РАН. – 1998. –Т. 4. – № 2. – С. 56 – 68.

90. Макаров, В.Ф. Оптимизация процесса обработки высокотехнологичных композиционных материалов методом фрезерования / В.Ф. Макаров, А.Е. Мешкас, В.В. Ширинкин // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий : материалы VII Всероссийской науч.-техн. конф. (Уфа, 23-24 марта 2017 г.) / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа. – С. 9 – 17.
91. Макаров, В.Ф. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов / В.Ф. Макаров, А.Е. Мешкас, В.В. Ширинкин // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – Пермь : Пермский национал. исследоват. политехнич. университет. – 2015. – Том 1 – С. 179 – 189.
92. Матвиенко, Ю.Г. Моделирование деформирования и разрушения тел с надрезами / Ю.Г. Матвиенко // Вестник научно-технического развития. – Москва, 2010. №9 (37). – С. 37 – 41.
93. Методические указания по дисциплине «Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из композиционных материалов» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; Сост. : Ю.С. Первушин, П.В. Соловьев, Г.М. Зильбан. – Уфа. – 2013. – 39 с.
94. Милейко, С.Т. Механика волокнистых композитов / С.Т. Милейко, Ю.Н. Работнов // Успехи механики. – 1980. – т.3. – вып.1. – С. 3 – 55.
95. Молодцов, Г.А. Напряженные элементы конструкций летательных аппаратов из КМ / Г.А. Молодцов – М. Машиностроение. – 1993. – 224 с.
96. Монтгомери, Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. – Л. : Судостроение. – 1980. – 380 с.
97. Мурашов, В.В. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления / В.В. Мурашов, А.Ф. Румянцев. – Москва : Кн. изд-во. – 2006. – Ч. 1. – 13 с.
98. Насонов Ф.А. Подкрепление крепежных отверстий в композитных деталях с помощью установки неметаллических втулок термокомпрессионным

- способом / Ф.А. Насонов // Перспективные материалы и структурообразующие технологии. – 2019. – С. 460 – 463.
99. Немировский, Ю.В. О влиянии структуры армирования на напряженно-деформированное состояние и податливость оболочек и пластин / Ю.В. Немировский, А.П. Янковский // Труды XVIII Междунар.конф. по теории оболочек и пластин. – Саратов. – 1997. – Т.3. – С. 152 – 161.
100. Неразрушающий контроль: справочник : в 7т. / под общ. ред. В.В. Клюева ; редкол.: И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге.- Москва : Ультразвуковой контроль. – 2004. – Т. 3.
101. Образцов, И.Ф. Оптимальная структура и прочность слоистых композитов при плоском напряженном состоянии / И.Ф. Образцов, В.В. Васильев // Разрушение композитных материалов. Труды 1-го Сов.-америк. симпозиума. – Рига. – 1979. – С. 142 – 148.
102. Образцов, И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов : учеб. пособие / И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков. – Москва : Машиностроение. – 1977. – 144 с.
103. Образцов, И.Ф. Проблемы проектирования тонкостенных конструкций из композиционных материалов. Расчеты на прочность: учеб. пособие / И.Ф. Образцов. – Москва: Машиностроение. – 1989. – вып. 30. – С. 3 – 6.
104. Огибалов, П.М. Механика полимеров / П.М. Огибалов, В.А. Ломакин, Б.П. Кишкин // - М.: Издательство Московского университета. – 1975. – 528 с.
105. Панчук, Ф.О. Методика определения прочности связи между резиной и металлокордом при динамическом нагружении / Ф.О. Панчук, Б.Д. Семак, И.Ф. Грабарь, Н.А. Оплоченко // Каучук и резина. – 1989. – №10. – С. 33 – 34.
106. Первушин Ю.С. Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из слоистых композиционных материалов : учеб. пособие / Ю.С. Первушин, В.С. Жернаков. – Уфа : Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – 2008. – 303 с.
107. Пикуль, В.В. Современное состояние теории оболочек и перспективы ее развития/ В.В. Пикуль // Изв. РАН. Мех. тв. тела. – 2000.– № 2. – С. 153 –168.

108. Победря, Б.Е. Механика композиционных материалов / Б.Е. Победря. – М., МГУ. – 1984. – 336 с.
109. Полилов, А.Н. Экспериментальная механика композитов : учеб. Пособие / А.Н. Полилов.– Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.– 2015. –375с.
110. Попов, Б.Г. Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами / Б.Г. Попов. - М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 1993. – 294 с.
111. Протасов, В.Д. Особенности проектирования и создания изделий из композиционных материалов / В.Д. Протасов // ВХО им. Д.И. Менделеева. – 1978. – № 3. – С. 289 – 293.
112. Пэйгано, Н. Модели для изучения эффектов на свободных кромках / Н. Пэйгано, С. Сони // В сб.: Межслойные эффекты в композиционных материалах. - М. : Мир. – 1993. – С. 9 – 87.
113. Работнов, В.Д. Механика композитов / В.Д. Работнов // Вестник АН СССР. – 1979. – № 5. – С. 50 – 58.
114. Рогожникова, Е.Н. Влияние кольцевых расслоений на прочность штифто-шпилечного соединения в органопластиковых корпусах / Е.Н. Рогожникова // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. - Москва : НТЦ «Информатика» - филиал ФГУП «НИИСУ». — 2017. – № 2(185). – С. 3 – 6.
115. Сапожников, С.Б. Дефекты и прочность армированных пластиков: Монография / С.Б. Сапожников; под ред. О.Ф. Чернявского. – Челябинск: ЧГПТУ. – 1994. – 162 с.
116. Сахабутдинова, Л.Р. Разработка методики расчета НДС композиционной оболочки в процессе изготовления / Л.Р. Сахабутдинова, О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – № 3. – С. 84 – 99. – DOI 10.15593/2499-9873/2019.3.05.
117. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов. / Л. Сегерлинд - М. : Машиностроение. – 1979. – 392 с.
118. Сергеев, В.Т. Анализ структуры многослойной ткани. / В.Т. Сергеев // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19. – №20.

119. Серебряков, О.Л. Установка для комплексного контроля многослойных крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов / О.Л. Серебряков, Д.А. Рапопорт [и др.] // Дефектоскопия. 1982. – №7. – С.15-18.
120. Скудра, А.М. Прочность армированных пластиков / А.М. Скудра, Ф. Я. Булавс - М. : Химия. – 1982. – 216 с.
121. Смердов А.А. Анализ эффективности оптимальных композитных оболочек многостеночной и трехслойной схем для отсеков ракет-носителей и разгонных блоков / А.А. Смердов, Ф.Т. Шон // Конструкции из композиционных материалов. – 2016. – № 3 (143). – С. 58 – 65.
122. Смердов А.А. Оптимизация композитных структур в ракетно-космической технике, МВТУ. – 2019. – 150 с.
123. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский, –Москва : Наука. – 1969. – 512 с.
124. Смирнов, С.В. Численное исследование эволюции напряженно-деформированного состояния структурно-неоднородного материала при одноосном нагружении / С.В. Смирнов, А.В. Коновалов, М.В. Мясникова, Ю.В. Халевицкий и [др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2016. – № 3. – С. 175 – 187.
125. Степанец Д.В. Исследование влияния близкого расположения закладных втулок к торцу сотовой панели на ее прочность методом конечных элементов / Д.В. Степанец // Уральский научный вестник. – 2019. – Т. 6. – № 3. – С. 63–65.
126. Степанов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний : справочник / М.Н. Степанов. – М. : Машиностроение. – 1985. – 231 с.
127. Тарнопольский, Ю.М. Инженерные методы оценки кромочного эффекта в плоских деталях из композита / Ю.М. Тарнопольский, Ю.Ю. Перов, В.А.

- Поляков // В сб.: Межслойные эффекты в композиционных материалах. – М. : Мир. – 1993. – С. 300 – 328.
128. Тарнопольский, Ю.М. Методы статистических испытаний армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, Т.Я. Кинцис. – М. : Химия. – 1981. – 272 с.
129. Тарнопольский, Ю.М. Особенности расчета деталей из армированных пластиков / Ю.М. Тарнопольский, А.В. Розе. – Рига : Зинатне. – 1969. – 274 с.
130. Тетерс, Г.А. Оптимизация оболочек из композитов / Г.А. Тетерс, Р.Б. Рикардс, В.А. Нарузберг. – Рига : Зинатне. – 1978. – 240 с.
131. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки : учеб. пособие / С.П. Тимошенко, С.М. Войковский. – Москва : Физматгиз. – 1963. – 635 с.
132. Томашевский, В.Т. О задачах механики в технологии композитных материалов / В.Т. Томашевский // Механика композитных материалов. – 1982. – № 3. – С. 486 – 503.
133. Томашевский, В.Т. Теория и методы обеспечения бездефектной макроструктуры армированных полимеров при переработке в конструкции специальной техники : учеб пособие / В.Т. Томашевский, В.И. Смыслов, В.Н. Шалыгин, В.С. Яковлев. – Москва : ЦНИИ информации. – 1984. – 316 с.
134. Тышкевич, В.Н. Прочность труб из армированных пластиков при малоцикловом нагружении / В.Н. Тышкевич // Конструкции из композиционных материалов. – 2011. – № 1. – С. 12 – 17.
135. Тышкевич, В.Н. Расчет и изготовление конструкций из армированных пластиков: уч. пособие / В.Н. Тышкевич, П.А. Кулько. – Волгоград : ВолгГТУ. – 2010. – 178 с.
136. Тышкевич, В.Н. Расчет на прочность труб из армированных пластиков при статическом и малоцикловом нагружении / В.Н. Тышкевич, В.П. Багмутов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 3. – С. 53 – 58.
137. Ужва, А.В. Особенности проектирования закладных элементов несущих систем, применяемых для разъемных соединений в композитных элементах / А.В. Ужва, А.В. Сергиенко, В.А. Шаповаленко // Автомобиле- и тракторостроение : Материалы Международной научно-практической

- конференции в 2-ух томах, Минск, 14 – 18 мая 2018 года / отв. ред. Д.В. Капский. – Минск: Белорусский национальный технический университет. – 2018. – С. 70 – 72.
138. Уитни, Дж. Экспериментальные методы изучения разрушения через расслоение / Дж. Уитни // В сб.: Межслойные эффекты в композиционных материалах. – М. : Мир. – 1993. – С. 193 – 299.
139. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. /В.И. Феодосьев // Сер. Механика в техническом университете; Т.2 – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2000. – 592 с.
140. Ферри, Дж. Вязкоупругие свойства полимеров / пер. с англ. под ред. Гуля В.Е. – Москва : Иностранная литература. – 1963. – 536 с.
141. Филь, С.А. Статистическая прочность на вырыв и смятие втулок в панелях из КМ / С.А. Филь, В.В. Мерзлюк, Г.В. Неминский, М.Н. Сейдмуратов, М.В. Муштай // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. – 2009. – №1(57).
142. Хилл, Р. Математическая теория прочности /Р. Хилл. –ГИТТЛ. – 1956. – 407с.
143. Цай, С. Анализ разрушения композитов / С. Цай, Х. Хан // Неупругие свойства композиционных материалов. – М. : Мир. – 1978. – С. 104 – 139.
144. Черных, К.Ф. Законы упругости для изотропных материалов (феноменологический подход) / К.Ф. Черных, И.М. Шубина // В кн. : Механика эластомеров. – Краснодар : КПИ. – 1977. – Т.1. – вып. 242. – С. 54 – 64.
145. Чернякин, С.А. Анализ роста расслоений в композитных конструкциях / С.А. Чернякин, Ю.В. Скворцов // Вестник СибГАУ. – Красноярск. – 2014. – № 4 (56). – С. 249 – 255.

Приложение А

Диаграммы значений нагрузки от перемещений, полученные при испытании

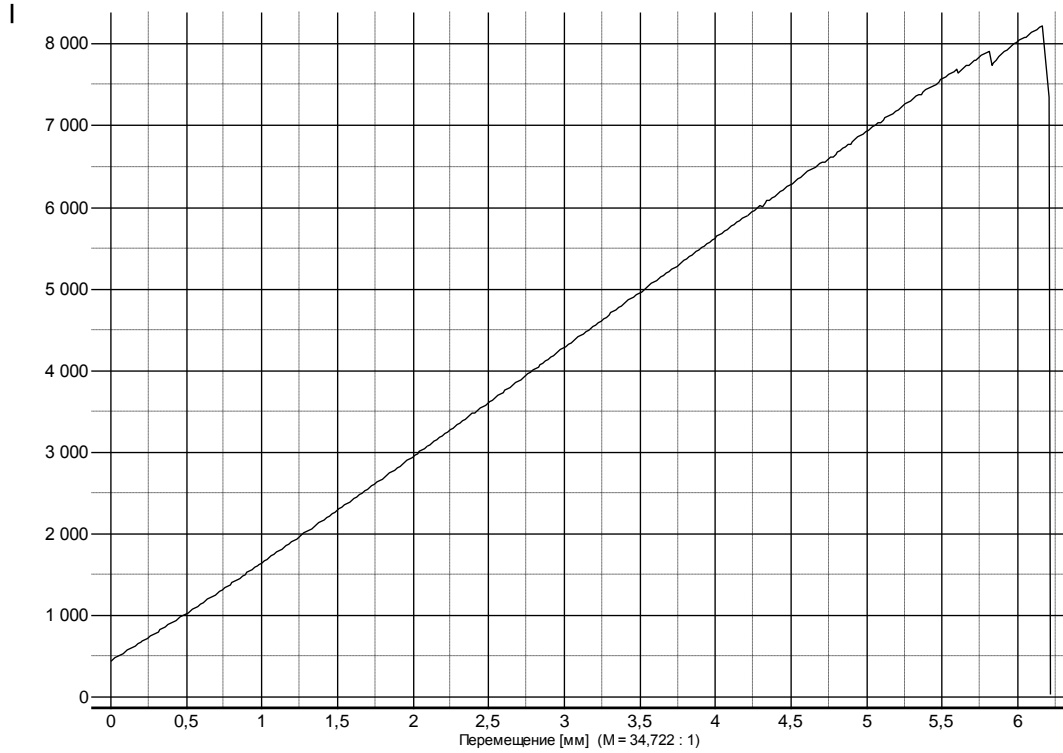


Рисунок 1 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 1

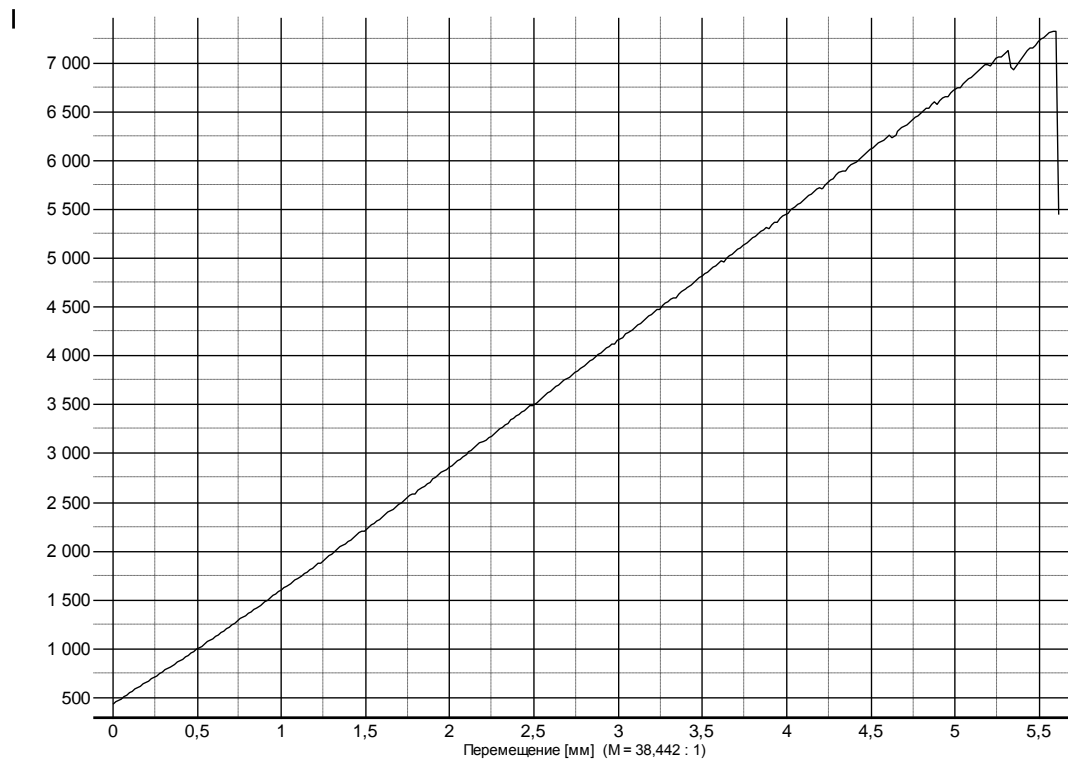


Рисунок 2 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 2

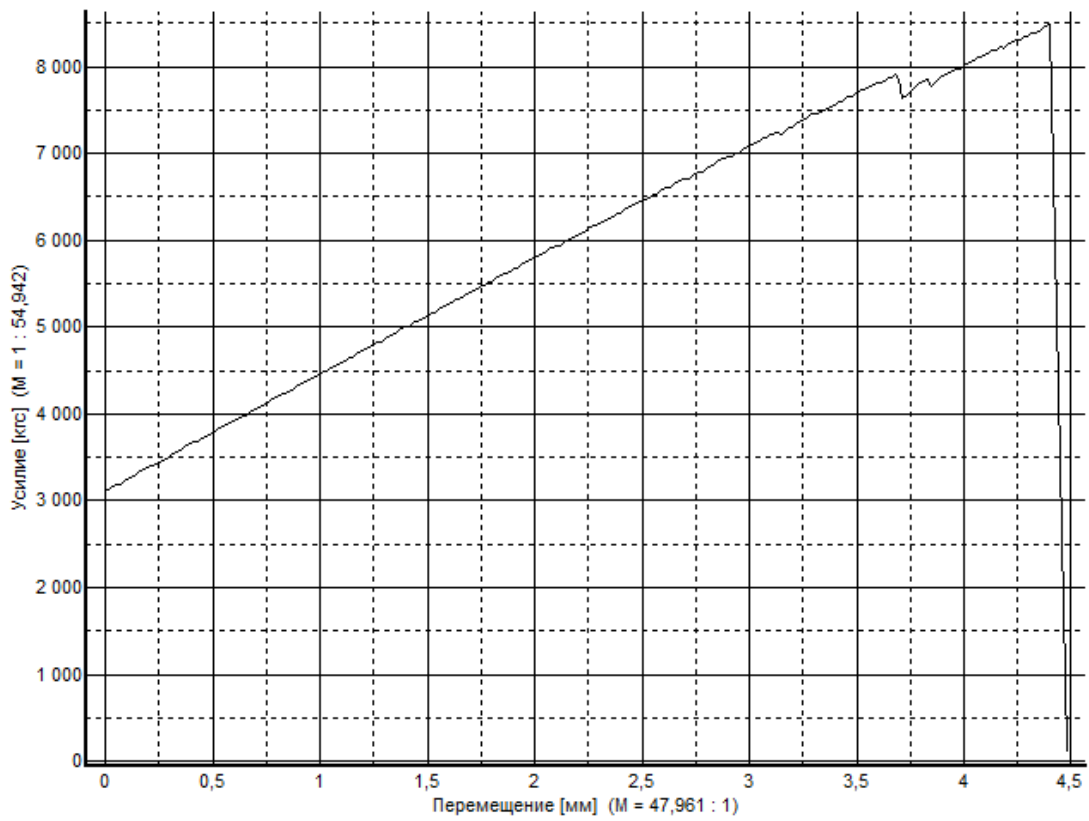


Рисунок 3 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 3

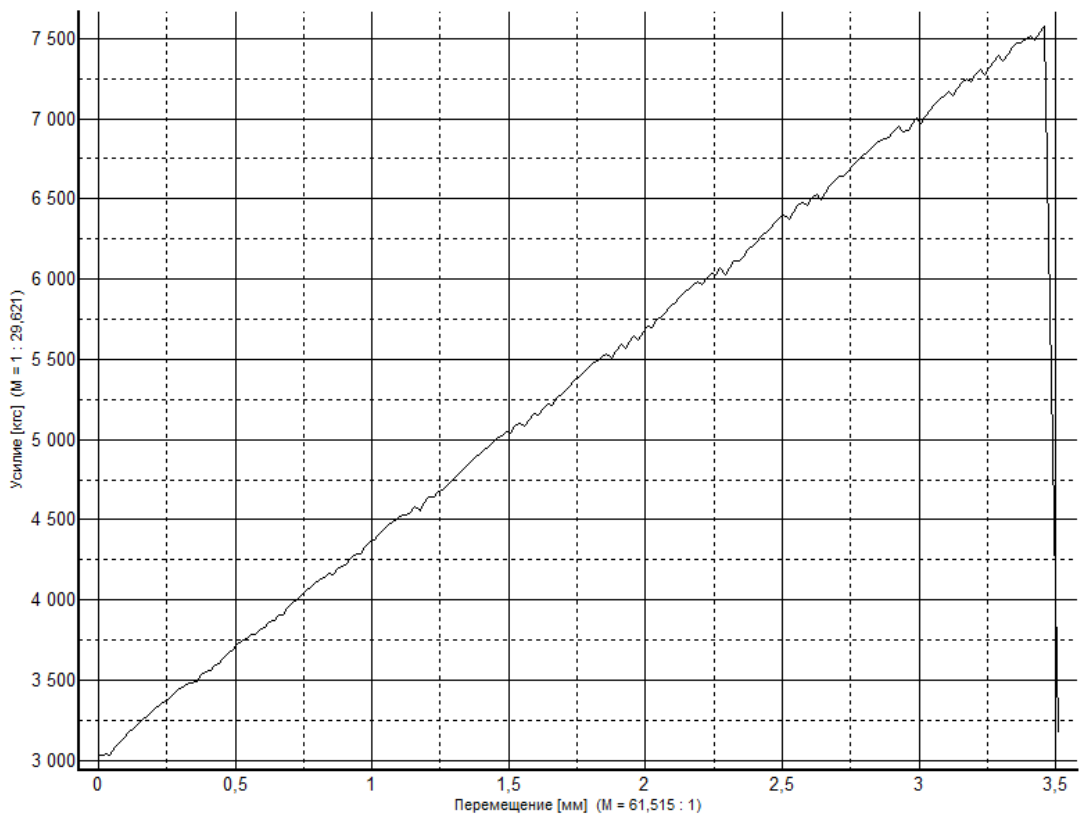


Рисунок 4 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 4

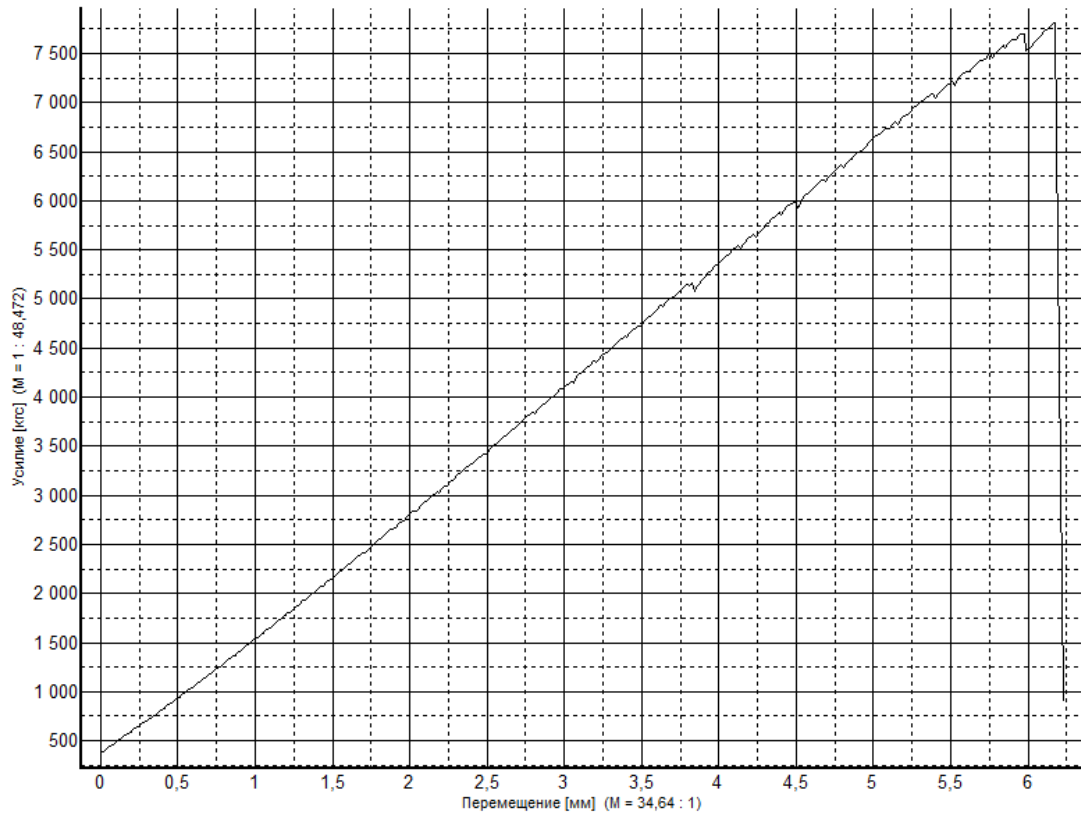


Рисунок 5 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 5

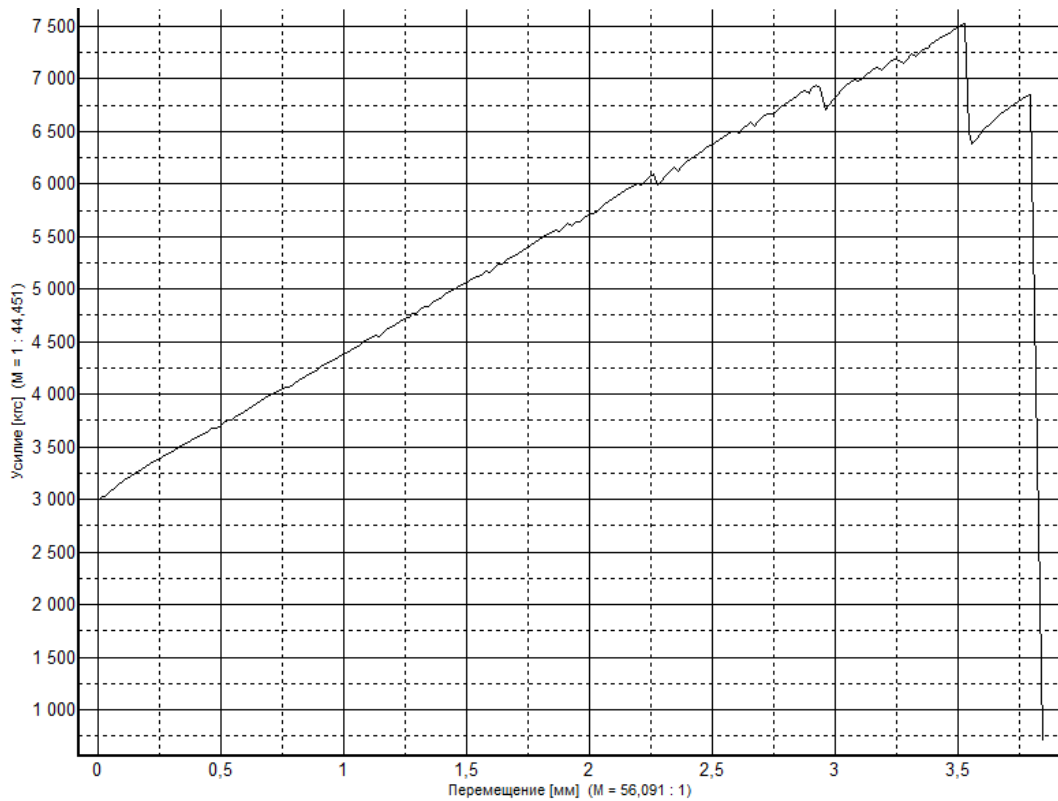


Рисунок 6 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 6

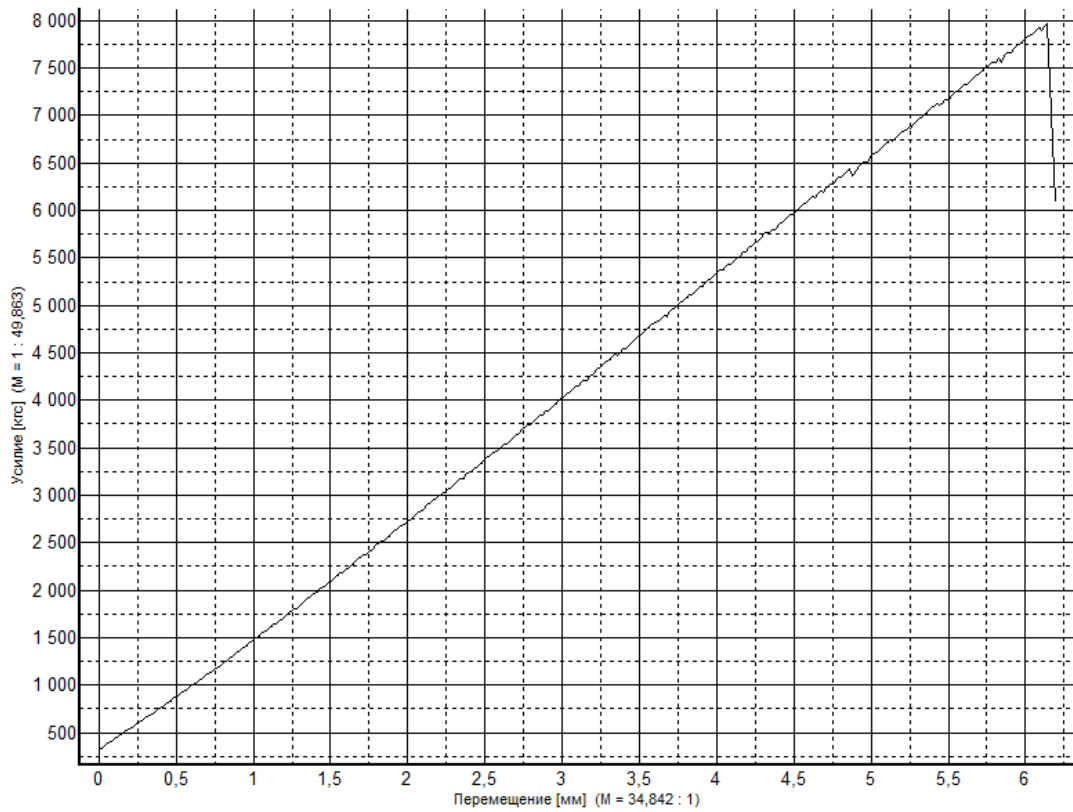


Рисунок 7 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 7

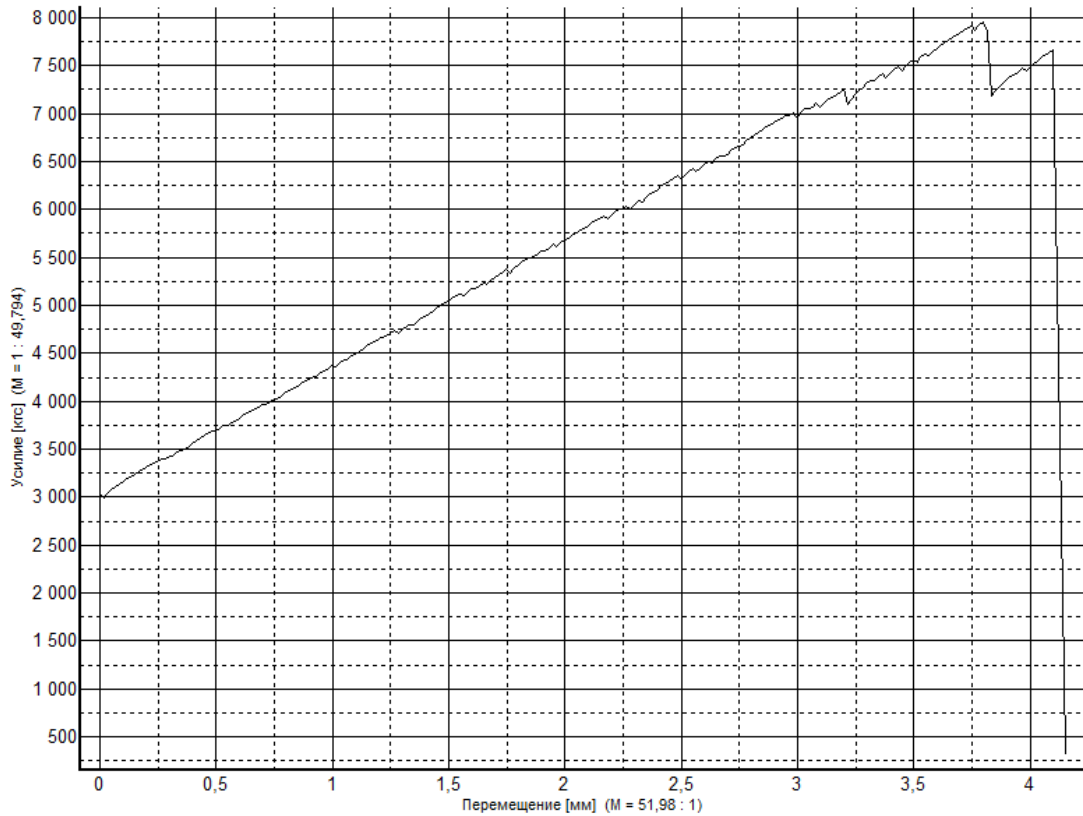


Рисунок 8 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 8

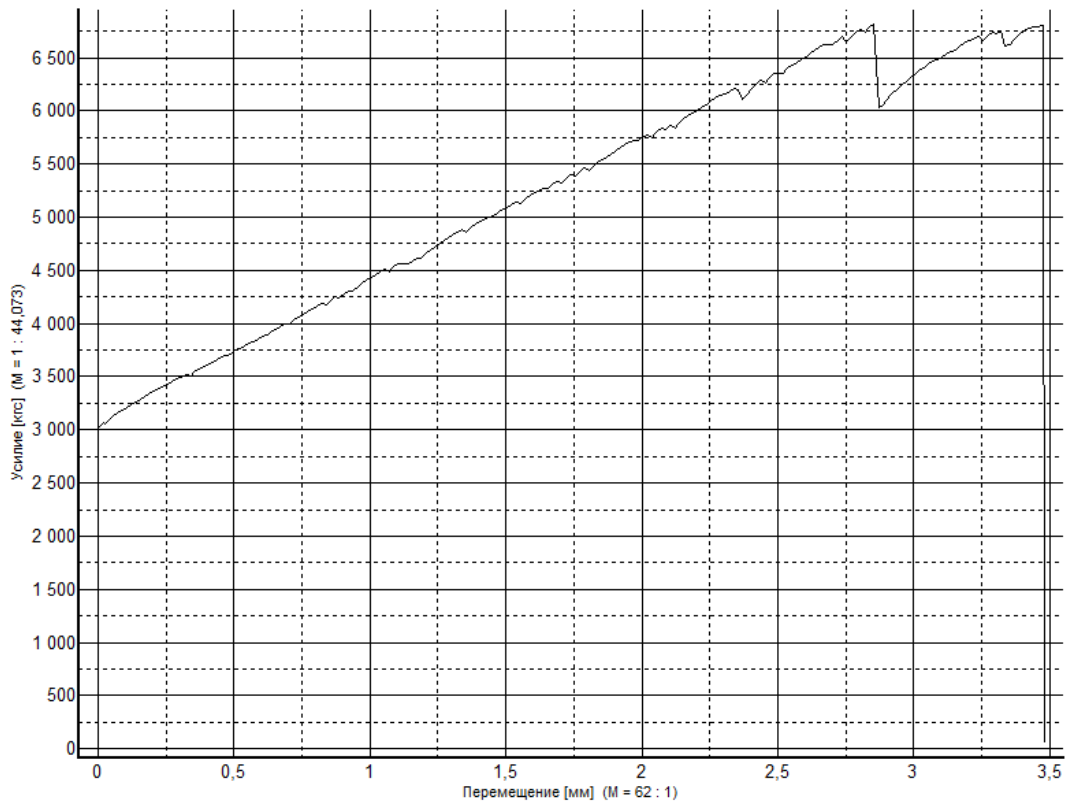


Рисунок 9 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 9

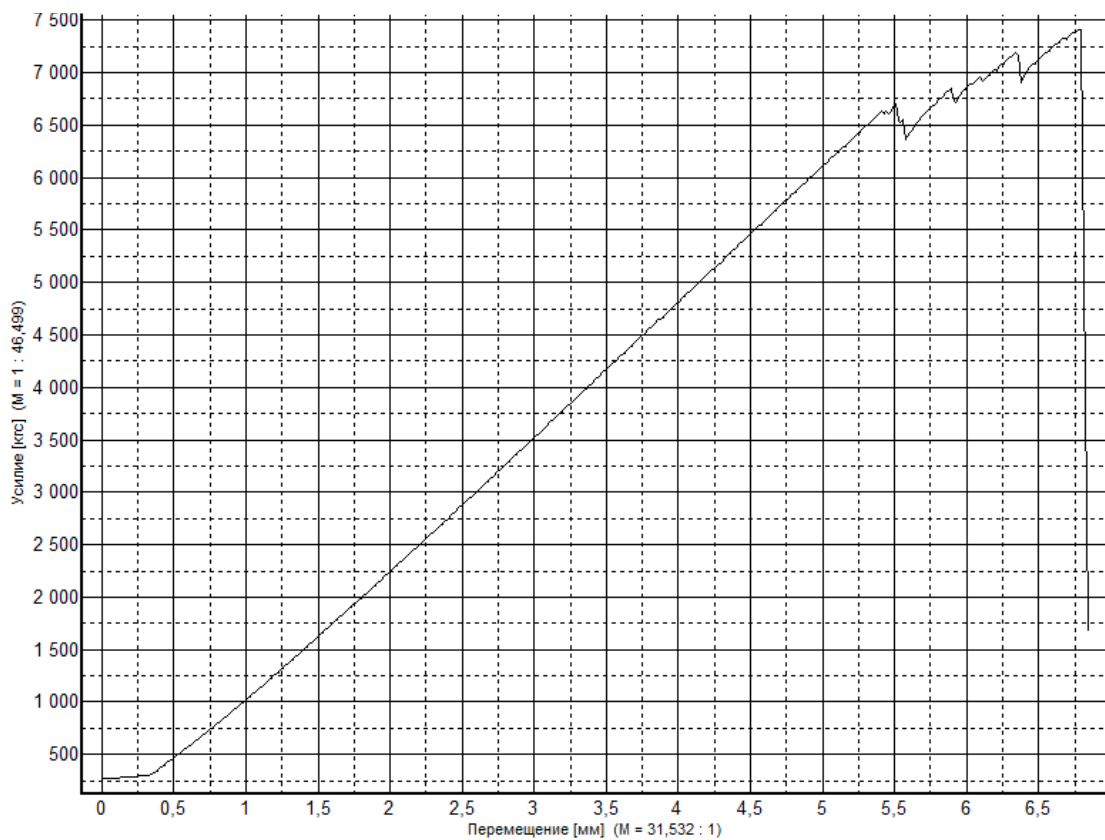


Рисунок 10 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 10

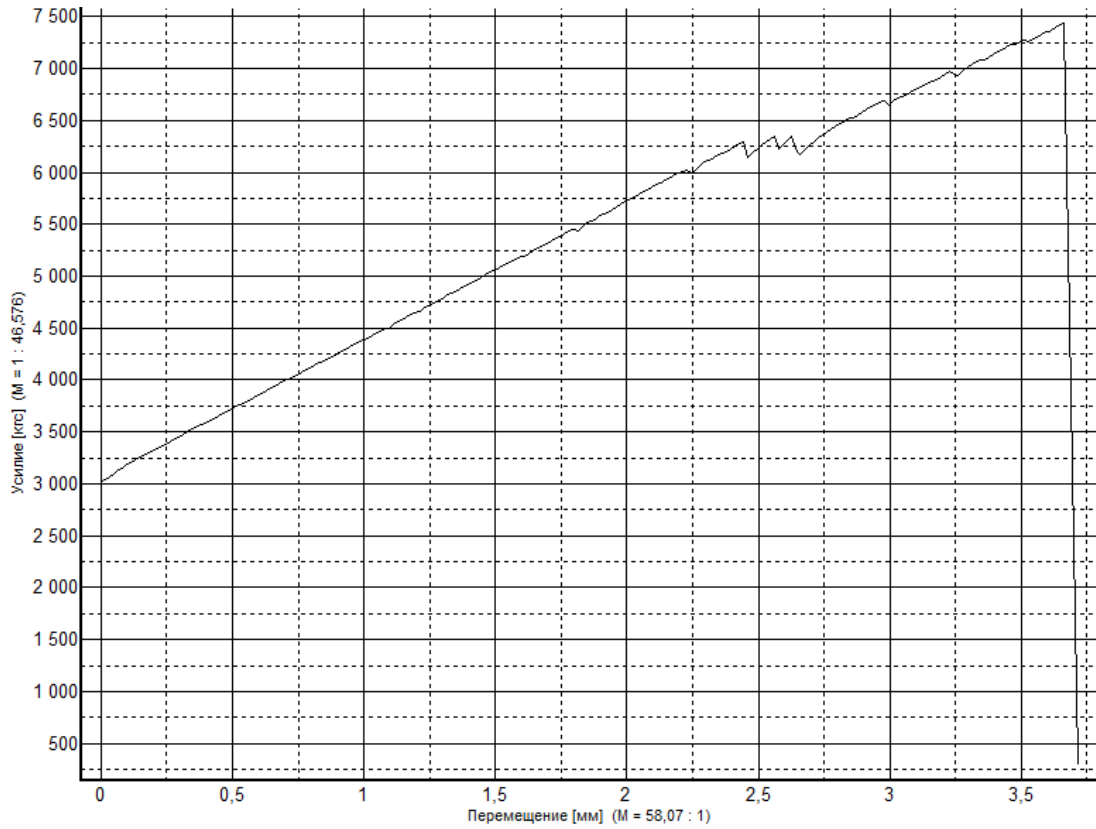


Рисунок 11 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 11

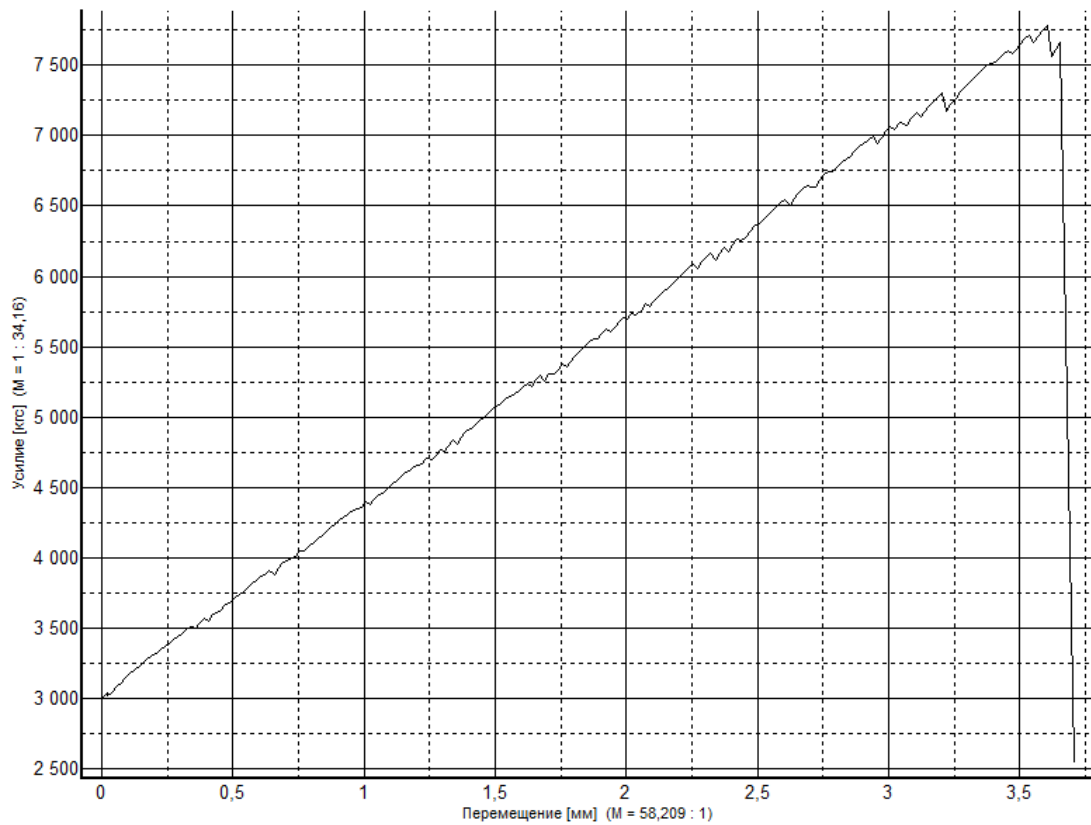


Рисунок 12 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 12

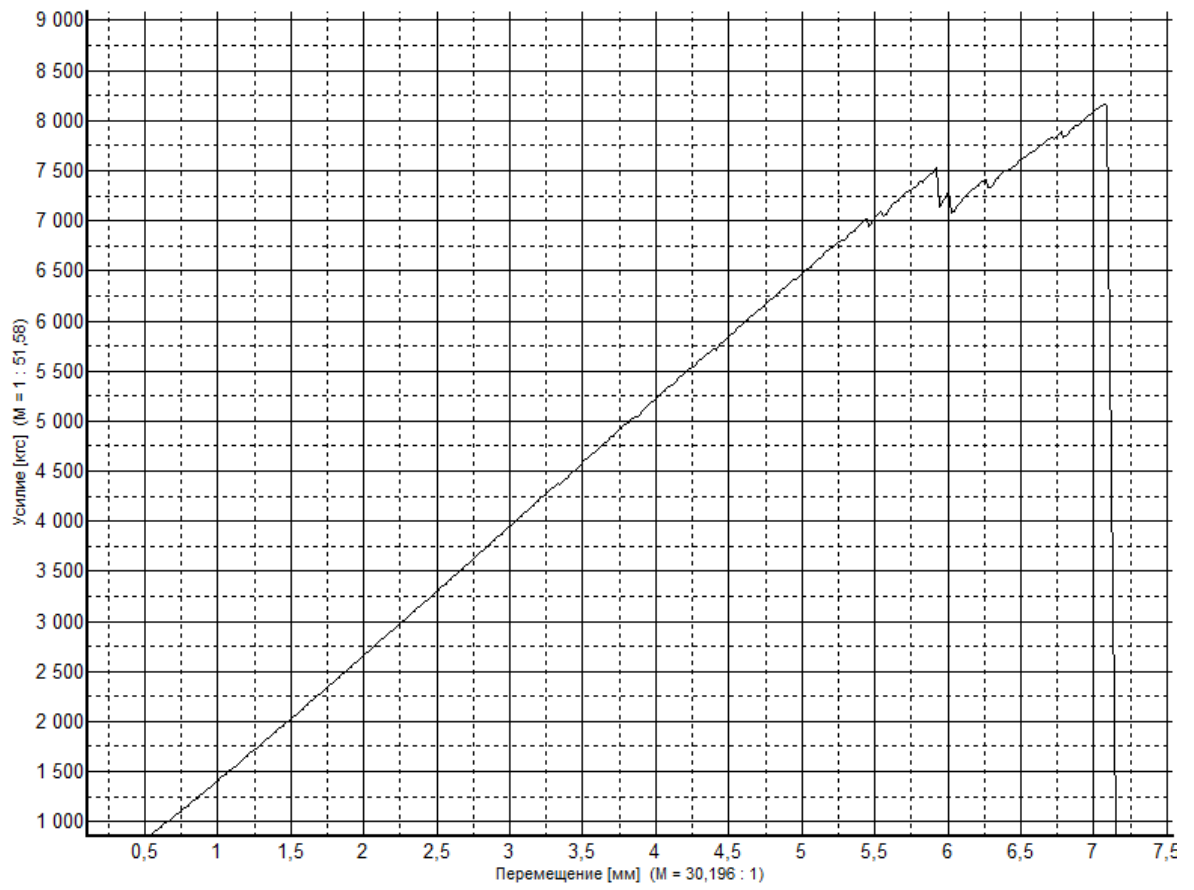


Рисунок 13 – Диаграмма значений текущей нагрузки и перемещений полудисков для образца 13

Приложение Б

Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебном процессе

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

**«Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет»
(ПНИПУ)**

614990, Пермский край, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д. 29,
тел. 8(342) 219-80-67,
факс 8(342) 212-39-27, e-mail: rector@pstu.ru
<http://www.pstu.ru>

УТВЕРЖДАЮ

Проректор ПНИПУ
по учебной работе



Н.В. Лобов

«5» марта 2011



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Рогожниковой Е.Н.
в учебный процесс ПНИПУ

Настоящим актом Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ) подтверждает факт внедрения в учебный процесс на кафедре «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» результатов диссертационной работы Рогожниковой Е.Н. по теме «Разработка методики диагностики технического состояния РДТТ при частичном расслоении узлов стыка», выполненной в федеральном научно-производственном центре ПАО «Научно-производственное объединение «Искра».

Разработанное учебно-методическое пособие включено в рабочую программу дисциплины «Динамика и прочность ракетных двигателей» по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», специализация «Проектирование ракетных двигателей твердого топлива» и используется при выполнении лабораторных работ по этой дисциплине.

/Заведующий кафедрой
«Ракетно-космическая техника
и энергетические системы»



М.И. Соколовский

Приложение В

Акт научно-технической комиссии о внедрении «Методики диагностики технического состояния РДТТ при частичном расслоении узлов стыка»

УТВЕРЖДАЮ

Зам. генерального директора – директор
направления ракетно-космической техники

С.А. Бондаренко



« 02 » 20 22 г.

АКТ

о внедрении «Методики диагностики технического состояния РДТТ при
частичном расслоении узлов стыка»

Научно-техническая комиссия ПАО «Научно-производственное объединение «Искра» (ПАО НПО «Искра») в составе:

Члены комиссии:	Зам. директора направления – главный конструктор РКТ	Иоффе Е.И.
	Зам. технического директора – главный технолог	Васильев И.Л.
	Начальник отдела 730	Осокин В.М.
	Начальник сектора 73001	Ознобишин А.Б.

Составили настоящий акт о том, что «Методика диагностики технического состояния РДТТ при частичном расслоении узлов стыка» внедрена и используется в ПАО НПО «Искра».

Методика позволяет определять коэффициент снижения предела прочности с учетом межслоевого расслоения при оценке работоспособности корпусов на основании экспериментальной зависимости предела прочности от величины коэффициента несплошности.

Экспериментальная зависимость относительного предела прочности от коэффициента несплошности, определённая на образцах с расслоениями, служит основой для диагностирования технического состояния корпусов

двигателей и экспресс-тестирования изготовленной композитной конструкции в отношении снижения её ресурсной способности.

Методика внедрена в расчетно-методическую базу НПО «Искра».

Члены комиссии:

Зам. директора направления –
главный конструктор РКТ



Иоффе Е.И.

Зам. технического директора –
главный технолог



Васильев И.Л.

Начальник отдела 730



Осокин В.М.

Начальник сектора 73001



Ознобишин А.Б.