

На правах рукописи



РОГОЖНИКОВА Елена Николаевна

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

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и Публичном акционерном обществе «Научно-производственное объединение «Искра».

Научный руководитель: *Бульбович Роман Васильевич*
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы»

Официальные оппоненты: *Сапожников Сергей Борисович*
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», главный научный сотрудник кафедры технической механики

Михайловский Константин Валерьевич
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции»

Ведущая организация: Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», г. Хотьково

Защита диссертации состоится «3» марта 2023 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.18 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614000 г. Пермь, Комсомольский пр., д.29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПНИПУ и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<https://pstu.ru>).

Автореферат разослан « 18 » января 2023 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Нихамкин
Михаил
Шмерович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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. Одним из значимых направлений применения конструкций из композитных материалов (КМ) является изготовление силовых корпусов, находящихся под давлением.

Корпуса из полимерно-композиционных материалов, формируемых совместно с вулканизацией теплозащитных, герметизирующих и антидиффузионных слоев. Корпуса из КМ следует отнести к сложным технологическим объектам с точки зрения напряженно-деформированного состояния (НДС), так как используемые конструкционные материалы имеют отличительные свойства по объемному расширению и усадочным явлениям в процессе технологических переделов и эксплуатации. Исследование контактирующих границ в их напряженно-деформированном состоянии как численными, так и экспериментальными методами представляет собой актуальную задачу.

Степень разработанности темы.

Одной из особенностей задач механики КМ является разработка методологии прогнозирования прочностных свойств и разрушений реальных материалов с дефектами. Описание процессов разрушения КМ является достаточно сложной задачей, поэтому аналитические методы моделирования элементов конструкций из КМ не всегда позволяют надежно анализировать их поведение под нагрузкой. Такую возможность представляют в последние десятилетия численные методы.

Исследование упругопластического поведения анизотропных композитов, таких, как волокнистые однонаправленные, слоистые с однородными и неоднородными слоями, является довольно сложной проблемой. Большинство конструкций являются тонкостенными и имеют слоистую структуру. Поэтому для изучения поведения конструкций из слоистых тонкостенных КМ широкое использование получила теория многослойных анизотропных оболочек. В литературе известно сравнительно небольшое количество работ, посвященных исследованиям в этом направлении (В.А. Калинин, М. С. Макаров, Н. А. Алфутов, С.П. Тимошенко, С. Войковский-Кригер, А.Н. Аношкин, М.В. Рудаков, Е.Н. Шустова).

Композиционные материалы, обладая высокой удельной прочностью и жесткостью, чувствительны к дефектам типа отслоений. Отслоение является наиболее распространенным видом дефекта и часто считается определяющим фактором при решении вопроса об использовании композитов в конструкциях.

В последнее время достаточно большое внимание уделяется проблеме устойчивости дефектов типа отслоений с последующим их подрастанием. Например, в работах В.В. Болотина, З.Х. Зебельяна, Е.Г. Викторова, Ю.М. Тарнопольского для случая локальной потери устойчивости дефекта определена критическая нагрузка. В работах Л.А. Бохоева, В.Б. Антохонова, Т.А. Дамдинова рассматривается полная реакция отслоений на действующую нагрузку, возможность роста зоны дефекта при наличии закритических деформаций.

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

Решались следующие задачи для достижения поставленной цели:

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. В диссертации получены следующие новые научные результаты.

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 межслоевыми 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 намотки 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 межслоевые 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 расчета 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 работы. Положения 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. Цирульникову, 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.).

Личный вклад. Все исследования в научной деятельности, представленные в диссертации, были проведены лично соискателем. Из совместных публикаций в диссертацию включен только материал, непосредственно принадлежащий соискателю, заимствованный материал указан ссылками.

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

Структура и объем работы. Диссертация 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 рисунка, 145 наименования литературных источников. Приложение на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены основные цели, задачи и методы исследования, отмечена научная новизна, практическая ценность, приводятся основные результаты диссертации, которые выносятся на защиту.

В первой главе на основе литературных источников представлен краткий анализ причин образования дефектов типа расслоений между слоями в тонкостенных конструкциях из КМ, а так же 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. Создание методики диагностики технического состояния корпусов РДТГ, имеющих частичное расслоение узлов стыка, является актуальной задачей и требует использования современного трёхмерного анализа напряженно-деформированного состояния

композиционной конструкции, составленной из разнородных композиционных структур.

Во второй главе в рамках исследований характеристик несплошности был проведен анализ дефектности изготовленных отверстий под штифто-шпилечное соединение на заднем и переднем узлах стыка. С учетом результатов ультразвуковой дефектоскопии проанализированы площади несплошностей на заднем и переднем узлах стыка.

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.

Анализируя полученные данные для конструкций узлов стыков, можно сделать вывод, о необходимости исследования влияния возникающих несплошностей в области штифто-шпилечного соединения на работоспособность корпуса численными методами.

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. Описаны результаты экспериментальных исследований прочности кольцевых органопластиковых образцов с различными областями расслоений на растяжение. На основе экспериментальных исследований подтвердили отрицательное влияние расслоений на снижение предела прочности материала.

Наличие расслоения, безусловно, приводит к ухудшению технического состояния конструкции и снижает ее работоспособность. Задача настоящего исследования дать численную оценку снижения несущей способности корпуса при имеющемся статистическом уровне дефектности в виде расслоения. Для характеристики уровня имеющихся расслоений в конструкции и в испытываемых образцах введен безразмерный коэффициент несплошности k .

Экспериментальные исследования влияния несплошности композита на предел прочности

Для экспериментального изучения и определения физико-механических характеристик кольцевых образцов с расслоениями на растяжение были изготовлены две партии образцов из органопластика. 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 3 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.

Во время испытаний велась непрерывная запись значений перемещений полудисков, текущей нагрузки и времени. Схемы нагружения в испытательной машине образцов с внедренным фторопластом представлены на рисунке 1.

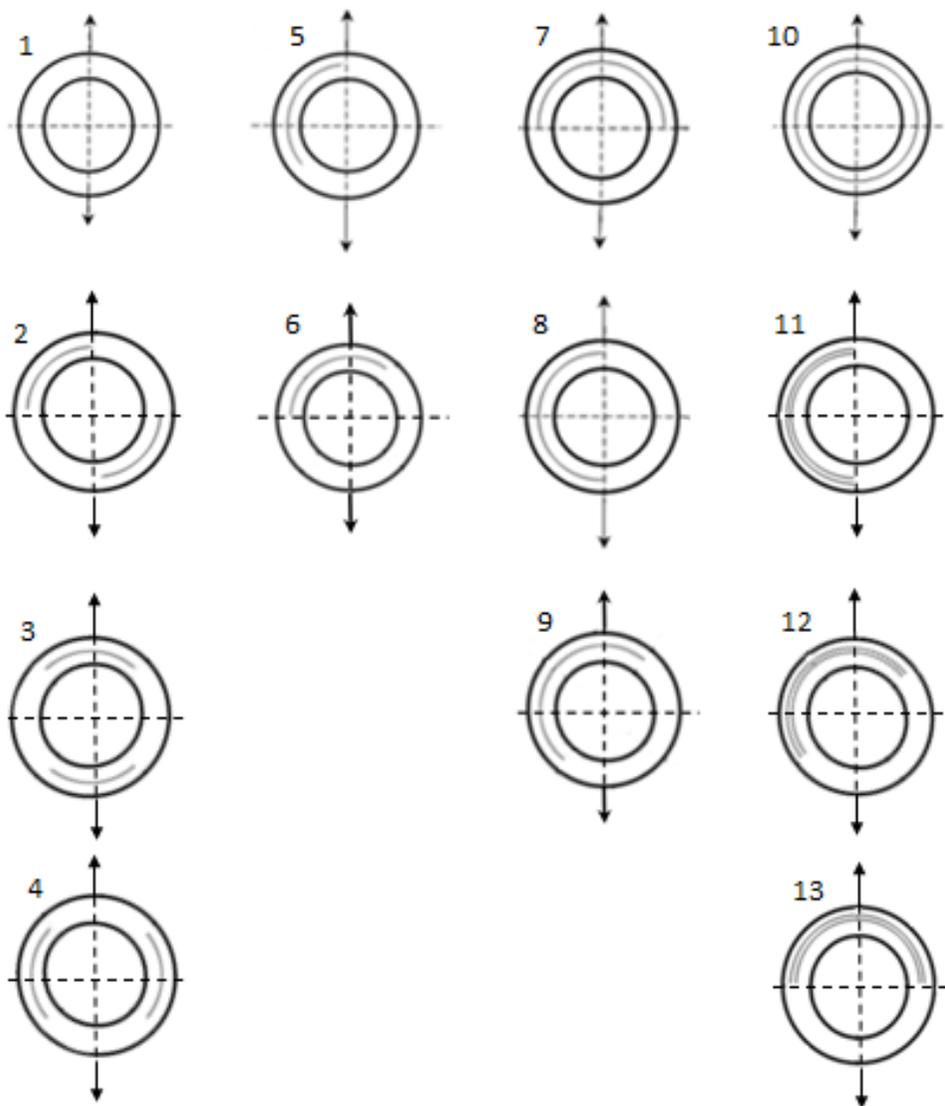


Рисунок 1 – Схемы нагружения образцов в испытательной машине

По приведенным диаграммам определены зависимости окружного напряжения σ от окружной деформации ϵ (рис. 2) и прочностные ФМХ кольцевых образцов (табл. 1).

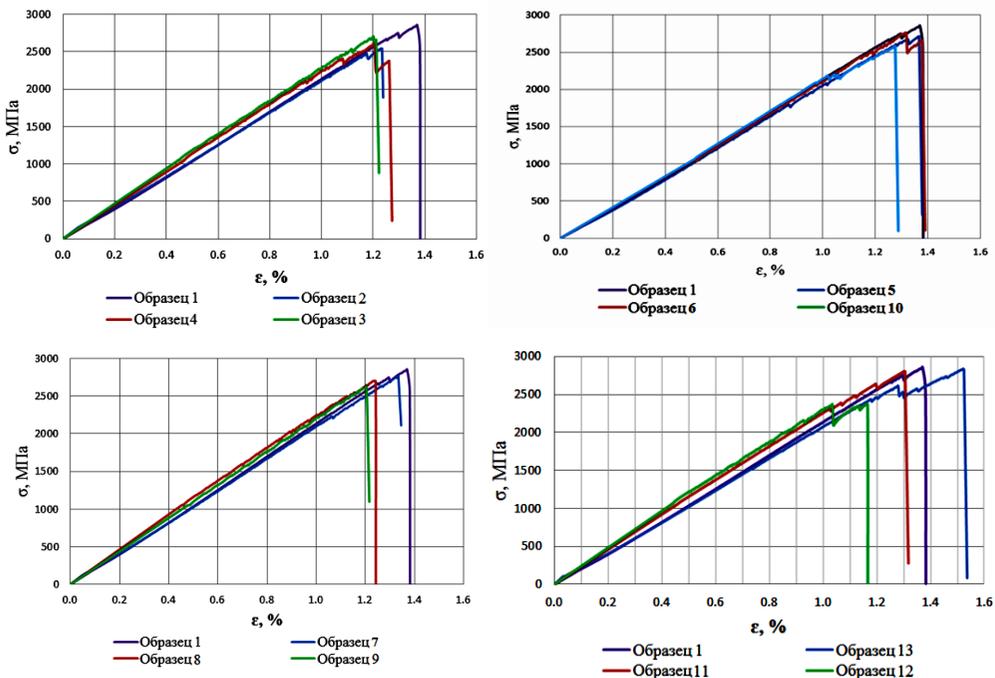


Рисунок 2 – Диаграммы растяжения образцов

Таблица 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 3.



Рисунок 3 – Образец после испытаний

Уровень снижения предела прочности для различных расположений расслоения, приведенных на рисунке 4, 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 кольцевого образца);
- от 5 до 17 % для схемы 5, 6 (расслоение на треть окружности).

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

По результатам проведенных испытаний на растяжение образцов из органолокна (табл. 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° относительно периферии расслоения получено наибольшее снижение предела прочности материала.
3. До 17 % снижается предел прочности для различных площадей несплошности.

Коэффициент несплошности

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

$$k = \frac{S_{\text{расслоен}}}{S_{\text{общ}} \cdot n}, \quad (1)$$

где $S_{\text{расслоен}}$ – площадь поверхности расслоения;
 $S_{\text{общ}}$ – площадь срединной поверхности образца;
 n – количество слоев в образце.

В таблице 2 приведен коэффициент несплошности для исследуемых образцов.

Таблица 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

В третьей главе изложены основные выводы по влиянию расслоений на работоспособность корпусов РДТТ, предложен метод оценки несущей способности корпуса с расслоениями. Показано, что корпус можно считать работоспособным, если область расслоения в многослойной композиционной оболочке по длине от стыковочного торца не более расстояния от отверстия под штифт до края оболочки. Расслоение композита в зоне резьбового соединения привело к повышению действующих напряжений среза в тканевом слое, уровень которых превышает допустимый, вследствие чего нагрузка перераспределяется между кольцевыми и спиральными слоями и как следствие несущая способность снижается в 2 раза.

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

При разработке математической модели ставится задача построения трехуровневой численной математической модели, позволяющей вычислить все компоненты тензора напряжения в слоях в зоне соединения композитной оболочки с металлическими закладными элементами.

Объектом исследования является слабо коническая сегментированная цилиндрическая оболочка, имеющая угол уклона образующей менее 1 градуса. Конструкция, содержащая закладные металлические элементы, приведена на рисунке 4. Узел стыка представляет собой систему двойных переплетенных спиральных и кольцевых слоев, изготовленных методом намотки однонаправленного ровинга. Предусмотрено усиление узла стыка дополнительными слоями текстильного наполнителя. В узлах стыка входят также элементы штифто-шпилечного соединения (ШШС).



Рисунок 4 – Общий вид исследуемой конструкции

Задача решалась с использованием метода конечных элементов на многопроцессорном программном комплексе.

Результаты исследований НДС сравнивались с натурными испытаниями. В таблице 3 приведены результаты проведенных испытаний и численных расчетов.

Таблица 3 – Результаты испытаний и расчетов

Параметр	Испытание	Расчет
Максимальное увеличение диаметра корпуса, мм	4,09	3,8
Удлинение корпуса, мм	-0,74	-0,68

Хорошее совпадение результатов расчета с результатами стендовых испытаний конструкции, нагруженной внутренним давлением, позволяет говорить о достоверности разработанных моделей. Граничные условия, полученные при расчете, переносились на усеченные модели (рис. 5) с целью дальнейшего анализа влияния расслоений на НДС конструкции.

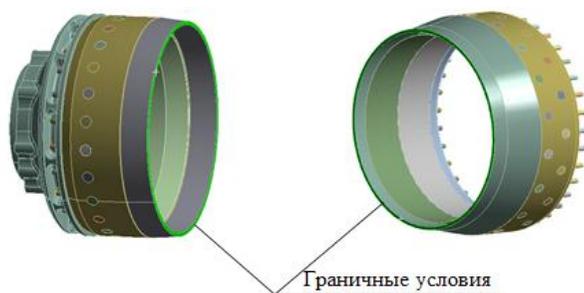


Рисунок 5 – Усеченные модели с граничными условиями

Для учета влияния расслоений на третьем этапе в модель второго уровня вводятся расслоения. В районе переднего и заднего узлов стыка задавался дефект в виде расслоения. При этом коэффициент несплошности k , ранее введенный по формуле (1) принимал в конструкции следующие значения: 0 (слои без расслоений); 0,01; 0,04; 0,06; 0,08 и 0,17. Дефект в виде расслоения для уменьшения времени счета моделировался через раскрепленное контактное граничное условие (рис. 6).

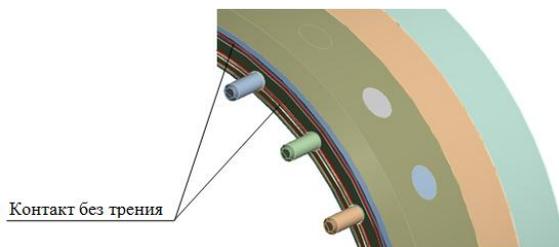


Рисунок 6 – Модель с раскрепленным контактом

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, характеризующий состояние нагруженной конструкции выражается в увеличении соответствующих напряжений от расслоения, что приводит к снижению ее несущей способности.

В таблице 4 приведены максимальные расчетные значения напряжений в соответствующих направлениях σ_x , σ_y , σ_z , для различных значений коэффициента несплошности конструкции.

Таблица 4 – Результаты расчета влияния расслоения на напряженное состояние цилиндрической оболочки

k	0	0,01	0,04	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

С использованием критерия максимальных напряжений оценивалась прочность конструкции по напряжениям в слоях

$$S_{11}^{c-} \leq \sigma_{11} \leq S_{11}^{c+}, \quad S_{22}^{c-} \leq \sigma_{22} \leq S_{22}^{c+}, \quad S_{33}^{c-} \leq \sigma_{33} \leq S_{33}^{c+}$$

$$S_{12}^c \leq \sigma_{12}, \quad S_{13}^c \leq \sigma_{13}, \quad S_{23}^c \leq \sigma_{23}, \quad (2)$$

где S_{11}, S_{22}, S_{33} – нормальные напряжения;
 S_{12}, S_{13}, S_{23} – касательные напряжения;
 \pm – растяжение - сжатие.

$$n_{ij}^{(p)} = \min_{r \in V^{(p)}} \left(\frac{S_{ij}^{c(p)}}{\sigma_{ij}^{(p)}(r)} \right) \quad (3)$$

и критерий Хашина в виде

$$fd(h) = \left(\frac{\sigma_{xx}}{S_{xx}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}} \right)^2, \quad (4)$$

где σ_{xx}, σ_{xy} и σ_{xz} – нормальные и касательные межслойные напряжения;
 S_{xx}, S_{xy}, S_{xz} – соответствующие пределы прочности материала.

Значение критерия $fd \geq 1$ соответствует межслоевому разрушению. Критерий Хашина позволяет учесть возможное взаимное влияния нескольких компонент напряжений на межслоевую прочность.

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

Целью данного исследования является оценка влияния несплошностей многослойной композитной структуры в условиях статической нагрузки на напряженно-деформированное состояние штифтового соединения, используемого для крепления металлических частей к органопластиковому корпусу.

На основе конструкторской документации была построена трехмерная модель корпуса со следующими допущениями: расслоение между слоями контактирующими друг с другом устанавливалось за счет трения, возникающего между ними. Для расчета были созданы следующие модели: без расслоений и две модели с расслоениями по цилиндрической части осевом направлении (рис. 7):

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

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

Проведенные исследования напряженного 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.

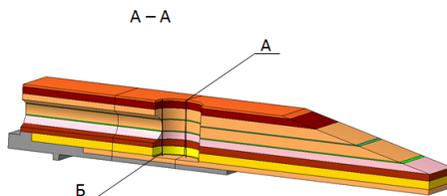
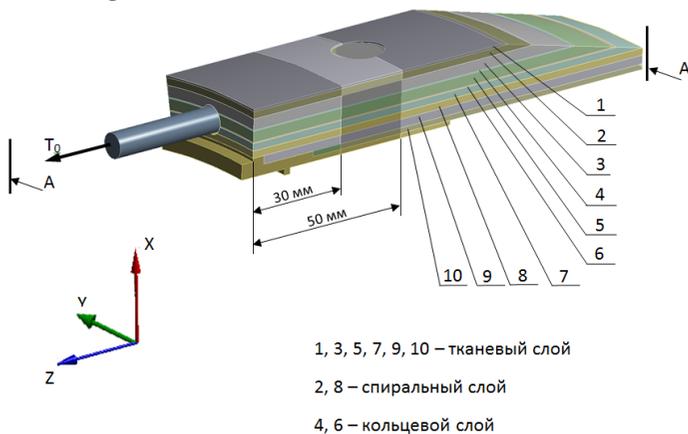
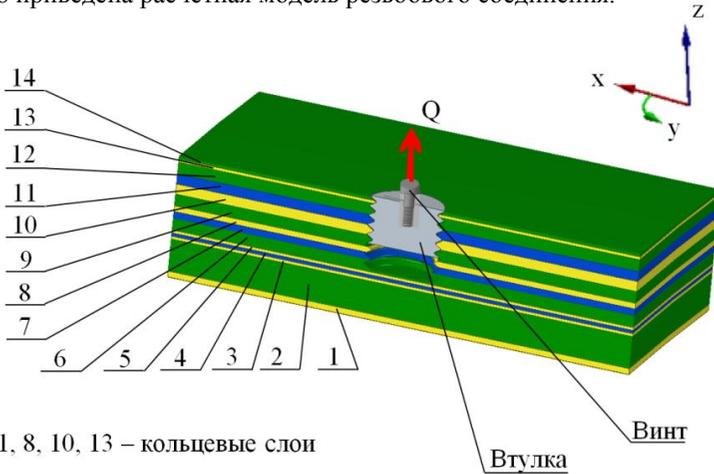


Рисунок 7 – Расчетная модель конструкции из КМ с ШШС

Влияние появления межслоевых дефектов на работоспособность резьбового соединения в композитном материале

В данной части исследования была поставлена задача определения влияния возникшего при изготовлении дефекта в композитном материале на работоспособность резьбового соединения при статических условиях нагружения. На рисунке 8 приведена расчетная модель резьбового соединения.



- 1, 8, 10, 13 – кольцевые слои
- 2, 6, 9, 12, 14 – тканевые слои
- 4, 7, 11 – спиральные слои

Рисунок 8 – Расчетная модель резьбового соединения

Расслоение привело к повышению действующих напряжений сдвига в тканевом слое, уровень которых превышает допустимый. Смоделированные расслоения снизили несущую способность резьбового соединения в 2 раза (рис. 9 и 10)



Рисунок 9 –
Зависимость напряжений сдвига в
кольцевом слое

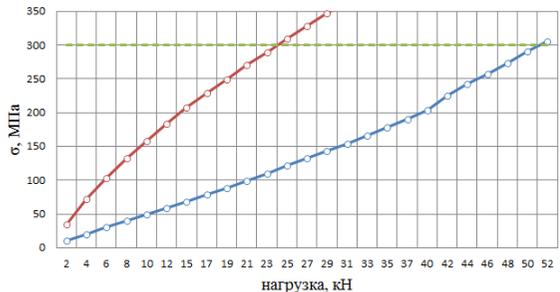


Рисунок 10 –
Зависимость напряжений сдвига в
спиральном слое

В четвертой главе изложена методика диагностики технического состояния корпусов РДТТ при частичном расслоении узлов стыка, основанная на математическом аппарате и численной реализации, изложенных в третьей главе.

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

Алгоритм расчета для получения напряженно-деформированного состояния крупногабаритной многослойной конструкции из композитных материалов включает разработку трех моделей. 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.

Описан пошаговый расчет получения эффективных упругих характеристик слоистых пакетов, секторов крупногабаритной многослойной конструкции из КМ.

Приведен пример использования экспресс-метода диагностики технического состояния композитных корпусов РДТТ при расслоении узлов стыка.

В заключении сформулированы и изложены основные результаты диссертационной работы:

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 45^0 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. Межслойное 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 межслойных 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».

В приложении приводятся диаграммы записи текущей нагрузки, времени и перемещений полудисков, полученные при испытании, а так же акт внедрения результатов диссертационной работы в учебном процессе и акт научно технической комиссии о внедрении «Методики диагностики технического состояния РДТТ при частичном расслоении узлов стыка».

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях ВАК РФ:

1. 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. М.: НТЦ «Информатика» - филиал ФГУП «НИИСУ». – 2017. – № 2(185). – С. 3–6.
2. Соколовский, М.И. Влияние межслоевого дефекта в композиционном материале на несущую способность резьбового соединения / М.И. Соколовский, Е.Н. Рогожникова, С.В. Патрулин, А.Б. Ознобишин // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. М.: НТЦ «Информатика» - филиал ФГУП «НИИСУ». – 2018. – № 2(190). – С. 3–8.
3. 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.

Статьи, опубликованные в изданиях индексируемых в базе Scopus:

4. Рогожникова, Е.Н. Расчет НДС и оценка прочности сегментированной цилиндрической оболочки из композиционных материалов с металлическими вкладышами / Е.Н. Рогожникова, А.Н. Аношкин, Р.В. Бульбович // Вестник ПНИПУ. Механика, 2022; (1). – С. 102–114 DOI – 10.15593/perm.mech/2022.1.06.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

5. Рогожникова, Е. Н. Влияние межслоевого дефекта в композиционном материале на прочность штифто-шпилечного соединения / Е. Н. Рогожникова // Сб. по мат-лам XVII Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации - 2016». – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2016. – С. 286–291.
6. Соколовский, М. И. Влияние кольцевых расслоений на несущую способность резьбового соединения в органопластиковых корпусах / М. И. Соколовский, Е. Н. Рогожникова, С. В. Патрулин, А. Б. Ознобишин // Сб. по мат-лам XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации - 2017». – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2017. – С. 240–247.
7. Рогожникова, Е.Н. Исследование прочности кольцевых образцов из композиционного материала с межслойными дефектами / Е.Н. Рогожникова, Д.С. Лобковский, А. Б. Ознобишин // Наука и технологии. Том 1. Мат-лы XXXVIII Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Южно-Уральского государственного университета – М.: РАН. – 2018. – С. 54–61.

8. Соколовский, М. И. Влияние УКИ на прочность кольцевых образцов из композиционного материала с межслойными дефектами / М. И. Соколовский, Р. В. Бульбович, Е. Н. Рогожникова, Д. С. Лобковский // Сб. по мат-лам XIX Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации - 2018». – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2018. – С. 281–288.

9. Шайдурова, Г.И. Определение зависимости относительного предела прочности от величины коэффициента несплошности / Г.И. Шайдурова, Е.Н. Рогожникова, А.Б. Ознобишин // Сб. по мат-лам XX Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации - 2019». - Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2019. – С. 212–216.

10. Соколовский, М. И. Исследование влияния межслоевого дефекта на НДС в многослойных конструкциях из композита / М. И. Соколовский, Р. В. Бульбович, Е. Н. Рогожникова // Сб. по мат-лам XI Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания», Москва – ФГУП ВИАМ. – 2019. – С. 295–303.

11. Рогожникова, Е.Н. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния крупногабаритных многослойных конструкций из разнородных материалов / Е.Н. Рогожникова // Материалы XVII молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее - 2019». – СПб – АО «ЦКБ МТ «Рубин». – 2019. – С. 314–323.

12. Шуткин, С.Г. Определение физико-механических характеристик оболочечных конструкций из композиционных материалов численным методом и ультразвуковым прозвучиванием / С.Г. Шуткин, Е.Н. Рогожникова, А.Б. Ознобишин // Сб. по мат-лам XXI Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации - 2020». – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2020. – С. 224–231.