

На правах рукописи



Титов Сергей Анатольевич

**МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ПРОДЛЕНИЯ ИХ РЕСУРСА**

Специальность: 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство
летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Жуковский – 2019

Работа выполнена в Государственном научном центре Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (г. Жуковский).

Научный руководитель: **Вермель Владимир Дмитриевич** - доктор технических наук, профессор, начальник научно-технического центра научно-производственного комплекса, Государственный научный центр, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

Официальные оппоненты: **Литвинов Валерий Борисович** - советник генерального директора, председатель НТС АО «РТ-Химкомпозит», член совета РОСТЕХ

Комиссар Олег Николаевич - кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-инновационной работе АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

Ведущая организация: АО «АэроКомпозит», г. Москва.

Защита состоится «27» июня 2019 года в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

<https://mai.ru/events/defence/>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.10
кандидат технических наук, доцент

Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных условиях расширяется применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационных конструкциях, обусловленное высокими удельными прочностными характеристиками ПКМ, а также более высоким, чем у металлических материалов, ресурсом при знакопеременных нагрузках. Однако реализация характеристик ПКМ в натурных конструкциях существенно ограничивается наличием в них узлов соединений деталей и агрегатов. В числе наиболее существенных факторов, определяющих снижение прочности в соединениях - повреждение кромок деталей и отверстий при проведении механической лезвийной обработки после формования, а также сложность обеспечения необходимых для восприятия знакопеременных нагрузок, плотных без зазорных посадок при установке металлических соединительных элементов в отверстиях вследствие существенно более низкой, по сравнению с металлом, прочностью полимерного связующего в композитных деталях. Такие же проблемы возникают при проведении восстановительного ремонта ударных повреждений в деталях из ПКМ с применением металлических накладок на поврежденные зоны, соединяемых с деталью металлическим крепежом (болты, заклепки). Обеспечение необходимых прочностных характеристик соединений, масса которых может составлять до 20% массы деталей конструкции планера летательного аппарата, достигается увеличением строительных толщин элементов и, соответственно, их материалоемкостью.

Повышение прочностных и ресурсных характеристик соединений в металло-композитных конструкциях, включая проведение ремонта, позволяет снижать массу летательного аппарата. В этой связи тема диссертационной работы является актуальной и практически важной.

Степень разработанности темы.

Полимерные композиционные материалы применяются в авиационных конструкциях с 1970-х годов. Разработке авиационных конструкций из ПКМ посвящены работы Ю.И. Попова, В.И. Резниченко, В.В. Васильева, Б.В. Бойцова, Г.Н. Замулы, К.М. Иерусалимского, О.Н. Комиссара, А.К. Хмельницкого Берсудского В.Е. и целого ряда других отечественных и зарубежных исследователей. Проектирование конструкций крыла из ПКМ рассматривается в работах В.И. Гришина, В.В. Лазарева, Ю.П. Трунина и др.

Исследованию соединений авиационных конструкций посвящены работы О.С. Сироткина, В.И. Гришина, В.Б. Литвинова, К. Кедварда, Х. Кима и др. В них, в частности, показано, что использование клее-болтовых соединений повышает прочностные и ресурсные характеристики соединений.

Разработке композиционных материалов и исследованию производственных технологий, а также специализированных авиационных клеев, посвящены работы Е.Н. Каблова, В.М. Виноградова, Л.И. Аниховской, Г.С. Головкина, Ф. Мэттьюза, Р. Ролингза, А. Бэйкера, С. Даттона, М.Л. Кербера, и др.

Влияние на механические характеристики ПКМ в авиационных конструкциях характерного для них знакопеременного нагружения, а также воздействия внешней среды, исследовались Е.Н. Кабловым, Ю.П. Труниным, Г.Н. Замулой и целым рядом других.

Механическая обработка изделий из ПКМ и возможные повреждения кромок деталей и отверстий при ее проведении рассмотрены в работах В.Д. Вермеля, Ф.М. Макарова, А.Е. Раскутина, Дж. Давима, М. Делериса, А. Паолетта, Л. Санто, и других. В них проведен анализ кромочных повреждений деталей из ПКМ при воздействии вращающегося инструмента, а также влияние качества обработки на прочностные характеристики деталей.

Влияние ударных повреждений на остаточную прочность деталей из ПКМ, а также технология их ремонта, исследовались в работах И.В. Гулевского, Г.Л. Ривина, Л. Браутмана, Л.И. Аниховской, Н.С. Жадова, М. Хотье, Д. Левека и др.

Освоение в последние годы нано-технологии и расширение производства нано-материалов в России (в частности под руководством А.Г. Ткачева, М.Р. Предтеченского, Э.Г. Ракова и целого ряда других исследователей) делает актуальным исследование их применения для повышения характеристик авиационных конструкций из ПКМ.

В целом ряде работ, выполненных в России и за рубежом (Е.Н. Каблов, С.А. ЛурьеВ.Д., Вермель, С.В. Кондрашев и др.), установлено, что диспергирование углеродных нано-волокон может привести к существенному повышению механических характеристик клеевой композиции и, соответственно, соединений с ее использованием вместо традиционного авиационного клея.

Наряду с этим объем выполненных исследований представляется недостаточным. К настоящему времени практически не установлено влияние концентрации и способа диспергирования нано-модифицирующих компонентов на повышение механических характеристик клеевых композиций, в частности таких, как прочность при растяжении, сжатии, сдвиге, вязкость и трещиностойкость, наиболее существенных при использовании в соединениях. Отсутствуют в заметных объемах результаты экспериментальных исследований применения клеевых композиций с повышенными характеристиками на методических и конструктивно-подобных образцах соединений, а также при проведении ремонта. Не исследовано возможное повышение прочности соединений деталей и агрегатов в авиационных конструкциях с учетом специфики реализации, а также ремонта их ударных повреждений.

Проведенное рассмотрение позволило определить цель и задачи диссертационной работы.

Цель диссертационной работы: обеспечение существенного повышения прочности и ресурса соединений в авиационных конструкциях с широким применением ПКМ, а также восстановительного ремонта низкоэнергетических ударных повреждений в деталях из ПКМ.

Для ее достижения **необходимо решение следующих основных задач:**

- 1) Выявление факторов, определяющих снижение прочности и ресурса соединений, и анализ результатов восстановительного ремонта деталей из ПКМ;
- 2) Исследование и разработка технологии механической обработки со снижением повреждаемости кромок деталей из ПКМ;
- 3) Устранение повреждений на кромках деталей и зазоров в отверстиях с соединительными металлическими элементами с применением нано-модифицированной клеевой композиции с повышенными прочностными характеристиками;
- 4) Разработка эффективной нано-модифицированной клеевой композиции с экспериментальным подтверждением повышения механических характеристик и вязкости, снижающей трещинообразование при циклических знакопеременных нагрузках;
- 5) Восстановление прочности деталей из ПКМ после ударных повреждений;
- 6) Экспериментальная апробация научно-технических решений на тематических и конструктивно-подобных образцах авиационных конструкций.

Объектом исследования являются авиационные конструкции с широким применением ПКМ.

Область исследования – механическая обработка деталей из ПКМ, соединения деталей и агрегатов в металло-композитных авиационных конструкциях; ремонт авиационных конструкций из ПКМ; механизм взаимодействия эпоксидной матрицы с углеродными нано-частицами различного типа, повышающими механические свойства формируемой клеевой композиции.

Методологической основой исследования являются работы российских и зарубежных ученых в области повышения прочностных характеристик авиационных конструкций из ПКМ, механической обработки деталей из ПКМ, проведения ремонтно-восстановительных работ ударных повреждений в агрегатах авиационных конструкций, диспергирования нано-модифицирующих углеродных

компонентов в полимерных матрицах, влияния углеродных нано-компонентов на свойства полимерных компаундов.

Методы исследования базируются на научных положениях теории машиностроения, механики композиционных материалов, проектирования и конструирования авиационных конструкций из ПКМ, нанотехнологии, методах и инструментальных средствах исследования прочности материалов и изделий из них. Экспериментальные исследования проводились в специализированных лабораториях ФГУП «ЦАГИ» и ИПРИМ РАН с применением методики испытаний пластин и панелей из ПКМ на сжатие при шарнирном опирании вертикальных кромок (методика ЦАГИ 03-7535), нестандартных образцов согласно ГОСТ 14759-69 и ГОСТ 90112-73 для испытаний на прочность и долговечность клеевых соединений при сдвиге.

Применялось современное лабораторное оборудование, включая оптические и электронные сканирующие микроскопы, для определения на микро- и макро- уровнях структуры полученных наномодифицированных клеевых композиций, специализированный измерительный комплекс «NanoTest 600» (Micro Materials Ltd., Англия), позволяющий определять методом наноиндентирования механические свойства материалов в наномасштабе.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1- Установлена взаимосвязь прочности и ресурса соединений деталей из ПКМ с основными факторами, определяющими технологию их изготовления.

2- Определены физические условия повреждения обработанных кромок деталей из ПКМ при механической лезвийной обработке и повышенных концентраций напряжений в узлах металло-композитных соединений.

3- Выявлены физические основы повышения прочностных характеристик и вязкости клеевой композиции в результате диспергирования ограниченного (1-2%) количества углеродных нано-компонент (УНК). Показана, наиболее высокая эффективность для структуризации клеевого компаунда нано-трубок с открытыми концами, образующиеся при их разломе в процессе диспергирования.

4- Показано, что наибольшее повышение прочности и ресурса в соединениях достигается при одновременной реализации нормированного натяга соединительных элементов и обработке разработанной нано-модифицированной клеевой композицией (НМК).

Теоретическая значимость состоит в выявлении физических условий повышения прочности и ресурса соединений в металло-композитных конструкциях и восстановительном ремонте ударных повреждений на основе применения нано-модифицированной клеевой композиции структурированной в результате диспергирования углеродных нано-трубок, сопровождающаяся их изломами.

Практическая значимость:

1- Экспериментально подтверждена возможность существенного повышения статической прочности (до 20%) и ресурса соединений (не менее чем в 4 раза) и восстановительного ремонта деталей из ПКМ с применением разработанной нано-модифицированной клеевой композиции (НМК) (патент РФ № 2607888 от 11.01.2017 «СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БОЛТОВОГО МЕТАЛЛО-КОМПОЗИЦИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ»).

2- Определены требования и осуществлен выбор рациональных параметров режущего инструмента (сверление, фрезерование) и разработаны технологические рекомендации по его применению с минимизацией повреждений кромок деталей из ПКМ и отверстий в соединениях.

3- Определен наиболее эффективный углеродный нано-компонент (УНК) - нано-трубки с открытыми концами, образующимися при их разломах в процессе диспергирования и установлена их рациональная массовая концентрация для повышения механических характеристик клеевой

композиции применительно к использованию при устранении повреждений кромок деталей, повышении прочности и ресурса соединений, проведению ремонта.

4- Разработана технология диспергирования углеродных нано-компонентов в клеевых композициях, обеспечивающая равномерность распределения и разломы УНК, повышающие активность взаимодействия с фрагментами эпоксидных цепей (патент РФ № 2500706 от 10.12.2013г «СПОСОБ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ В ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ»).

5- Подготовлены рекомендации к проведению ремонтно-восстановительных работ для агрегатов авиационных конструкций, использованные в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» при подготовке методических материалов и рекомендаций по проведению ремонта типовых элементов авиационных конструкций из ПКМ.

6- Разработана конструкция соединений деталей из ПКМ с применением нано-модифицированной клеевой композиции. Получено экспериментальное подтверждение повышения прочностных и ресурсных характеристик на изготовленных конструктивно-подобных образцах.

7- Разработан способ восстановительного ремонта низкоэнергетических ударных повреждений в панелях из ПКМ с применением металлических вставок, устанавливаемых в детали после выборки поврежденного материала с нормированным натягом и с отбортовкой, не вступающей более чем на допустимые 0.5мм за обводообразующую поверхность.

На защиту выносятся следующие результаты:

1- Экспериментально установленная взаимосвязь технологических параметров лезвийной механической обработки (сверление, фрезерование) деталей из ПКМ и характерных кромочных повреждений деталей, а также плотности посадок металлических соединительных элементов с прочностью и ресурсом деталей и соединений, включая результаты ремонтно-восстановительных работ.

2- Способ диспергирования модифицирующих углеродных нано-компонентов в эпоксидном компаунде, обеспечивающий повышение механических характеристик и трещиностойкости (вязкости) образуемой клеевой композиции вследствие структуризации клеевого компаунда под воздействием УНК.

3- Конструкция метало-композитных соединений с повышенными прочностью и ресурсом за счет снижения повреждаемости при механической лезвийной обработке и применения разработанной нано-модифицированной клеевой композиции;

4- Конструкция восстановительного ремонта низкоэнергетических ударных повреждений на основе применения металлических вставок с фиксирующей отбортовкой, устанавливаемых с нормированным натягом в детали после выборки поврежденного материала, вступающих не более чем на допустимые 0.5мм за обводообразующую поверхность.

Личный вклад автора заключается в следующем:

1. Выявление влияния качества механической обработки (фрезерование, сверление) деталей из ПКМ на их прочность; разработке рациональной технологии механической обработки деталей из ПКМ по условиям минимизации повреждений с контролем температуры в зоне резания.

2. Экспериментальное подтверждение повышения характеристик клеевой композиции при диспергировании в ней углеродных нано-трубок, включая выявление роста эффективности с увеличением количества открытых углеродных нано-трубок, формируемых при их изломе в процессе диспергирования.

3. Определение рационального содержания углеродных нано-модифицирующих компонент в клеевой композиции.

4. Технология повышения прочности и ресурса металло-композитных соединений за счет заполнения нано-модифицированной клеевой композицией зазоров между отверстием и крепежным элементом.

5. Способ ремонта низкоэнергетических ударных повреждений в изделиях из ПКМ, обеспечивающий восстановление прочности и жесткости при минимальном нарушении аэродинамической поверхности.

6. Подготовка, на основании полученных результатов, материалов, использованных в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» при разработке методики проведения ремонтно-восстановительных работ изделий из полимерных композиционных материалов.

7. Разработка конструктивно-подобных образцов для проведения экспериментальных исследований, организация и проведение подтверждающих экспериментальных исследований, обработка результатов.

Достоверность определяется адекватным применением сертифицированных программ и средств САПР, включая расчеты МКЭ, использованием при проведении экспериментальных исследований сертифицированного оборудования, методик и стандартов, достаточным объемом экспериментальных исследований на конструктивно-подобных образцах, изготовленных авиационными предприятиями и в производстве ФГУП «ЦАГИ».

Внедрение результатов работы.

Разработанные на основе выполненной работы технологические рекомендации по механической лезвийной (фрезерование, сверление) обработке ПКМ для минимизации повреждений на обрабатываемых кромках деталей, а также технология повышения прочности и ресурса металло-композитных соединений с применением нано-модифицированной клеевой композицией внедрены:

1- В Научно-производственном комплексе (НПК) ЦАГИ при изготовлении аэродинамических моделей, а также образцов деталей из полимерных композиционных материалов (в т.ч. вырезаемых из агрегатов натуральных изделий) в обеспечении проведения прочностных испытаний объектов авиационной техники.

2- В ПАО «Корпорация «Иркут» при подготовке образцов для испытаний на статическую прочность и усталостную долговечность.

3- В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», при разработке рекомендаций по проведению ремонтно-восстановительных работ поврежденных деталей и агрегатов из ПКМ.

Полученные результаты апробированы при выполнении целого ряда контрактных и договорных работ, в том числе:

- Федеральная целевая программа (ФЦП) «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002-2010 годы и на период до 2015 года», контракты шифры «Модель 2011», «Основа».

- Госпрограмма РФ «Развитие авиационной промышленности на 2013 - 2025 годы», контракты шифры «Развитие», «Скорость», «Стенд-2020», «Стрекоза», «Ренессанс».

-В договорных работах с предприятиями и институтами авиационной промышленности (ПАО «Корпорация «Иркут», АО «ОНПП «Технология» им. АГ Ромашина», ПАО «Компания «Сухой»), а также НИИ ИПРИМ РАН и ИМАШ РАН.

Соответствие паспорту специальности. Выполненная научно-исследовательская работа соответствует областям исследований паспорта специальности 05.07.02:

12. **Технологические процессы, специальное оборудование для изготовления деталей летательных аппаратов, включая технологию изготовления деталей из композиционных материалов;**

13. **Технологические процессы, специальное и специализированное оборудование для сборки, монтажа и испытаний, ремонта летательных аппаратов, их систем и агрегатов, в том числе**

двигателей, включая технологию и средства:

- **узловой, агрегатной и общей сборки;**
- **образования разъемных и неразъемных соединений в процессе сборки летательных аппаратов при помощи болтовых соединений, сваркой, пайкой, клепкой, склеиванием и их комбинациями**, в том числе с использованием робототехнических систем;
- **выполнения вновь разрабатываемых соединений, специфичных для производства летательных аппаратов.**

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15 научно-технических конференциях, в том числе 9 международных: III-й международной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», г. Москва, ИМАШ РАН, 13-15 мая 2014г; II международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии глубокой переработке сырья – основа инновационного развития экономики России», г. Москва, 27 июня 2017 г.; 15-я Международная конференция "Авиация и космонавтика", г. Москва, 2016 г.; VIII международной конференции «Композиты СНГ», г. Сочи, 11-12 октября 2018; 4-й Европейский Конгресс по транспортной авиации 17 августа 2011года в рамках МАКС-2011, г. Жуковский, 2011г.; Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии переработки сырья – основа инновационного развития экономики России» г. Москва, ФГУП «ВИАМ», 26-27 июня 2012 г.; III международной научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития», г. Ульяновск, 1-2 ноября 2012 г.; I Международная научно-практическая конференция «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение», г. Тамбов, 11-13 ноября 2015 г.; XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», 12-15 апреля 2016 г.; 6-я Всероссийская научная конференция с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред», г. Москва, ИПРИМ РАН, 2016г.; III отраслевой конференции ЦАГИ по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов «КИМИЛА 2018», г. Жуковский, 5-6 июня 2018 г.; XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Казань, 20 – 24 августа 2015 г.; научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов», г. Жуковский, 2016г., и ряде др.

По материалам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ, из них 5 – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ. Получено 2 свидетельства на патенты РФ:

- изобретение № 2500706 от 10.12.2013г «Способ диспергирования наночастиц в эпоксидной смоле», Титов С.А./ Вермель В.Д., Доценко А.М., Аниховская Л.И., Кладова Л.С., Ткачев А.Г., Слепов С.К., Мележик А.В.;
- изобретение № 2607888 от 11.01.2017 «Способ повышения прочности болтового металлокомпозиционного соединения», Титов С.А./ Барышников О.Е., Вермель В.Д./

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 219 страниц, в том числе 126 рисунков и 28 таблиц. Список цитированной литературы содержит 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыта актуальность выбранной темы исследования, показана степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи работы. Рассмотрены результаты, показана их

научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Дано краткое описание диссертации по главам.

В первой главе рассмотрены основные проблемы снижения прочности и ресурса соединений в металло-композитных авиационных конструкциях. Показано, что они связаны прежде всего с повреждением кромок деталей из ПКМ при проведении их механической размерной обработки (сверление, фрезерование, расточка), а также гидроабразивной и лазерной резки (рис. 1) после формования для придания необходимых геометрических размеров, а также изготовлении проемов и отверстий в узлах соединений. Образующиеся дефекты типа микротрещин, ворсистости, сколов связующего, расслоений обнаруживаются не только на обработанных кромках, но и проникают на некоторую глубину в прикромочной зоне (Рис. 2). Их наличие обуславливает ускоренное разрушение деталей при статических и циклических нагрузках.

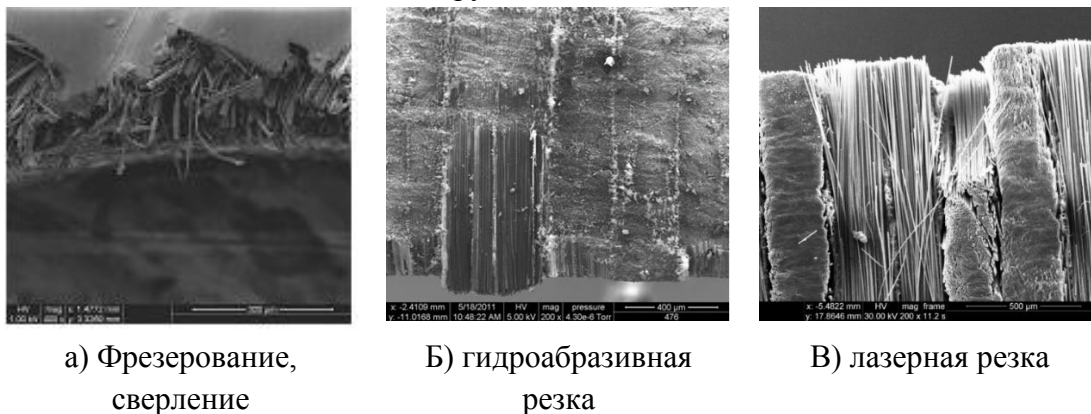


Рисунок 1 – Дефекты на кромках деталей из ПКМ, возникающие при обработке

Повреждения для гидроабразивной и лазерной резки оказываются существенно выше, чем при механической обработке, что обусловило их широкое применение при изготовлении малонагруженных авиационных конструкций (деталей интерьеров, теплоизоляции и т.д.). Использование отрезных дисков ограничивается простыми контурами. Основной объем составляет механическая обработка, используемая при изготовлении деталей силовых конструкций.

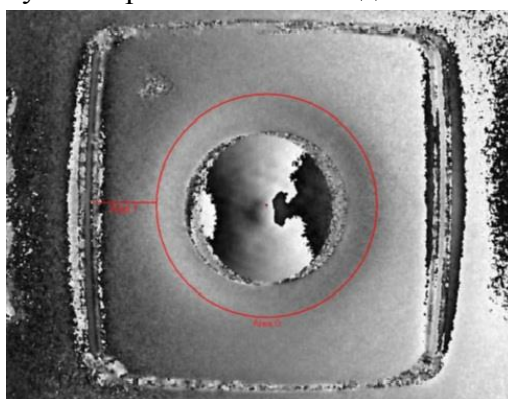


Рисунок 2 – Поврежденная зона в образце из ПКМ после механической обработки (метод шерографии)

Важным условием долговечности соединений является плотная, без зазоров, посадка металлических соединительных элементов (болт, заклепка) в отверстиях соединяемых деталей. Для деталей из ПКМ существенно низкая, по сравнению с металлом, прочность полимерного связующего не позволяет непосредственно получить плотную посадку металлических соединительных элементов в отверстия, в том числе и из-за повреждения кромок (Рис. 3).

Анализ изготовленных в заводских условиях конструктивно-подобных образцов (Рис. 4) многоточечных металло-композитных соединений показал наличие неравномерных зазоров между болтами и отверстиями, которые приводят к существенному увеличению концентраций контактных напряжений, до 4-8 крат (Рис. 5) и к неравномерному нагружению болтов.

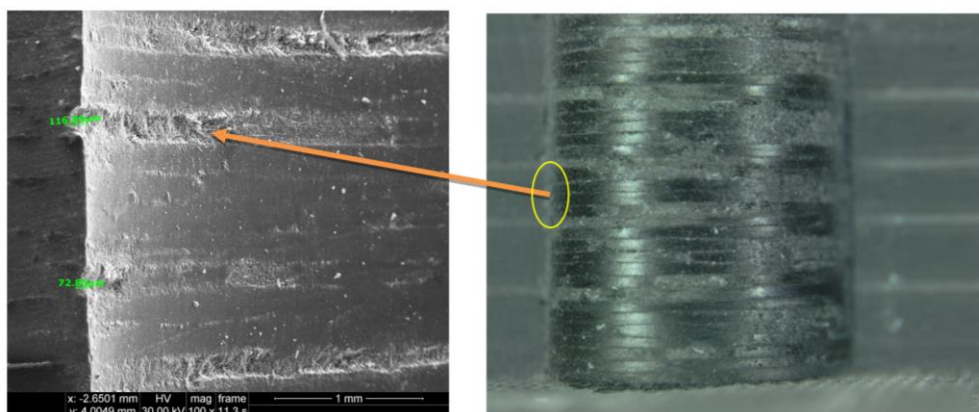
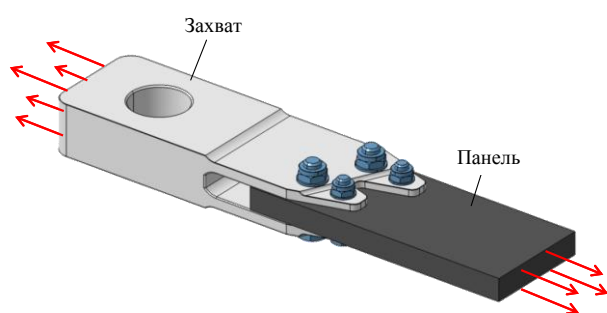


Рисунок 3 – Повреждения на обработанных сверлом краях отверстий (характерная глубина повреждений 0.1мм)



а) Конструктивно подобный образец соединения в металло-композитных конструкциях



$\Delta = d_{отв} - d_{болт}, \text{ МКМ}$



б) Результаты измерения зазоров между отверстиями и болтами

Рисунок 4

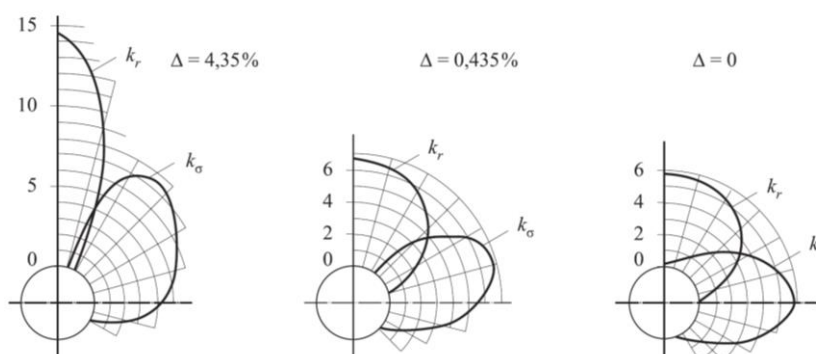


Рисунок 5 – Зависимость коэффициентов концентрации контактных (k_r) и растягивающих (k_σ) напряжений на контуре отверстия от величины относительного зазора Δ между отверстием и болтом в соединении

Низкие прочностные характеристики полимерного связующего, по сравнению с металлическими болтами, приводят к смятию кромок отверстий в деталях из ПКМ фактически превращая их в изгибающийся пуансон, что в результате ведет к изгибам соединительных элементов вместо среза, существенно снижая прочность соединения. Иллюстрируется на полученной нами по результатам

расчета МКЭ картине деформаций соединительного металлического элемента и композитной детали (рис. 6).

Необратимая деформация, связанная с изгибом болтов, показанная на фотографии рисунок 7, фактически совпадает с результатом, полученным при расчете напряженно-деформированного состояния многорядного соединения.

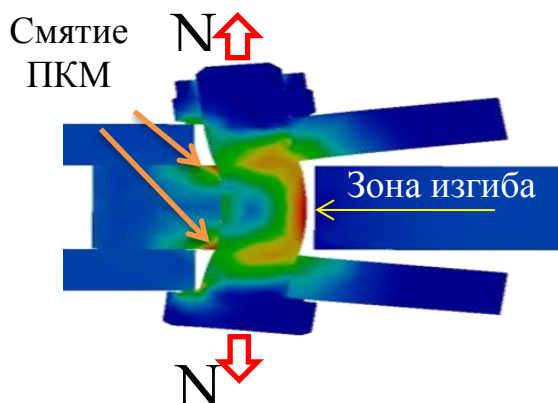
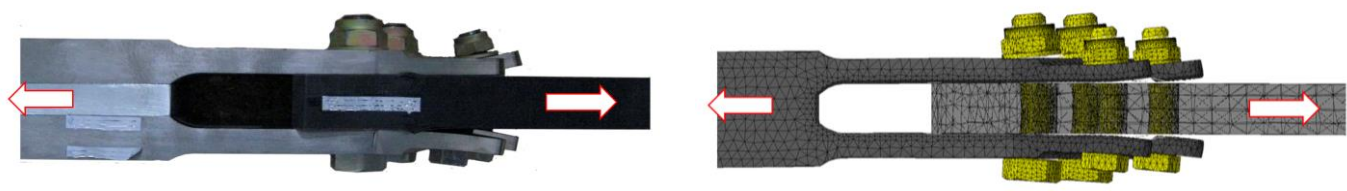


Рисунок 6 – Распределение напряжений в болтовом соединении, цветом иллюстрируются распределения напряжений



а) Фотография

б) МКЭ модель

Рисунок 7 – Необратимые деформации узла соединения

Схожие проблемы возникают при проведении восстановительного ремонта ударных повреждений с металлическими накладками на поврежденные зоны, соединяемых с деталью металлическим крепежом (болты, заклепки).

Испытания отремонтированных образцов трехстрингерных панелей, в обеспечение проекта МС-21, показали, что наличие зазоров между крепежными элементами и отверстиями в композиционной детали приводят к неодновременному включению в работу крепежных элементов и, как следствие, снижению прочности. На рис. 8 изображена эпюра приведенных напряжений в отремонтированной зоне, полученная по результатам тензометрических измерений при сжатии реального конструктивно-подобного образца. Видно, что в зоне ремонта напряжения существенно снижаются, что свидетельствует о неполном включении накладок. Передача силовых потоков происходит за счет догружения зон детали по обе стороны от повреждения.

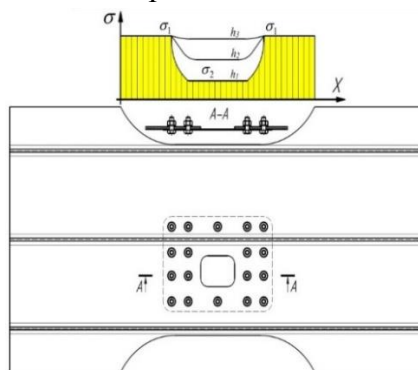


Рисунок 8 – Эпюра напряжений в зоне ремонта

Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований выявили задачи, решение которых может обеспечить повышение прочности и ресурса металло-композитных соединений:

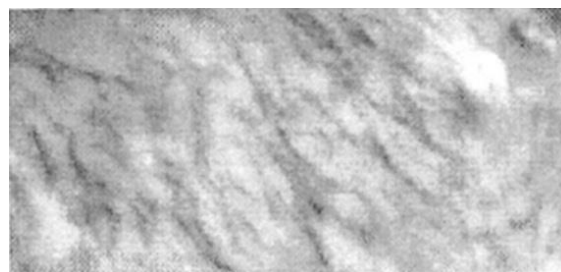
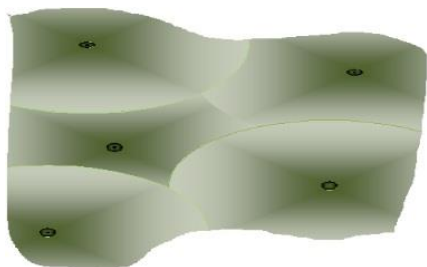
- разработка клеевой композиции с повышенной прочностью при растяжении, сжатии, сдвиге, вязкостью и трещиностойкостью, заполнение ею повреждений на кромках и зазоров в соединениях;

- снижение повреждения кромок путем подбора инструмента и технологических параметров при обработки деталей из ПКМ;

- использование рациональной предварительной затяжки болтов, уменьшающей изгиб при воздействиях со стороны детали из ПКМ.

Вторая глава посвящена разработке клеевой композиции с повышенными характеристиками прочности и трещиностойкости.

Одним из возможных способов повышения механических характеристик конструкционных клеев на основе эпоксидной смолы является их структуризация при диспергировании углеродных nano-компонент (УНК). Схема структуризации (С.А. Лурье), а также результаты ее экспериментального подтверждения представлены на рис. 9а и рис. 9б соответственно. При добавлении УНК и их агломератов в полимерную матрицу образуются зоны уплотнения, границы которых становятся стопперами трещин, что повышает вязкость клеевой композиции.



А) Результат аналитической оценки добавления углеродных nano-частиц в полимерную матрицу (Лурье С.А., ИПРИМ РАН).

Б) изображение получено с применением туннельного электронного микроскопа (Polymer-Clay Nanocomposites, USA).

Рисунок 9 – Структуризация полимерного связующего в результате диспергирования углеродных nano-трубок (УНК)

Для оценки повышения модуля деформации клеевой композиции, характеризующего её вязкость, проведен расчет по методу асимптотического усреднения Н.С. Бахвалова [Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П., 1984], определяющим решение линейной задачи упругости для параллельной ячейки с условиями проскальзывания по всем граням. Рассматривается напряженно-деформированное состояние для ячейки в массиве клеевой композиции (Рис. 10).

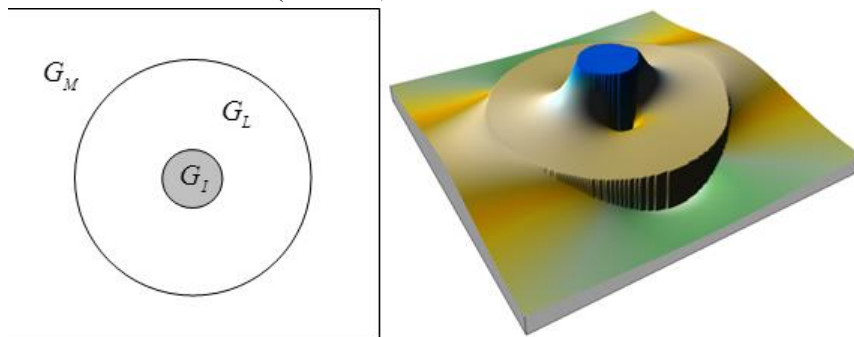


Рисунок 10 – Выделенная ячейка в массиве клеевой композиции

Расчетные соотношения:

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \left(A_{ij}(\xi) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \xi_j} \right) = 0, \quad [\mathbf{u}] = \left[A_{ij}(\xi) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \xi_j} n_i \right] = 0, \quad \mathbf{p} = A_{kj} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \xi_j} n_k,$$

$$u_1|_{S_1^\pm} = 0, \quad p_s|_{S_1^\pm} = 0, \quad u_2|_{S_2^\pm} = 0, \quad p_s|_{S_2^\pm} = 0, \quad u_3|_{S_3^\pm} = \pm 0.5L_3, \quad p_s|_{S_3^\pm} = 0.$$

Здесь S_k^\pm – грани, ортогональные направлению ξ_k , p_s – вектор касательных сил на поверхности грани, $A_{ij}(\xi)$ – матрицы, характеризующие жесткостные параметры включений, матрицы и слоя, $A_{ij} = \left\{ \mu(\delta_{ij}\delta_{kl} + \delta_{jk}\delta_{il}) + \lambda\delta_{ik}\delta_{jl} \right\}$, $[u]$ – перемещение.

Расчёт выполнялся для двух углеродных nano-компонент – металл/углеродных частиц (МУЧ) и углеродных nano-трубок. В экспериментальной валидации нами использовались МУЧ в виде мелкодисперсного порошка из частиц меди, распределенных в углеродной матрице, идентичных по размерам и форме аморфному углероду) и углеродные nano-трубки.

Для них было проведено экспресс диспергирование и выполнена оценка модуля деформации методом nano-индентирования. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Модули деформации клеевых композиций (E , ГПа).

Метод оценки	Образец 1 исходный	Образец 2 (МУЧ)	Образец 3 (УНТ)
Метод асимптотического усреднения Н.С. Бахвалова		2,62	3,09
Эксперимент	2.3-2.5	2,6	3,2

Видно соответствие результатов эксперимента с моделью Н.С. Бахвалова.

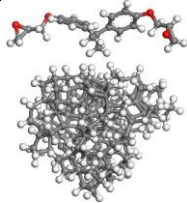
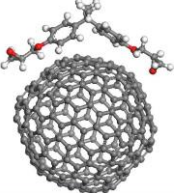
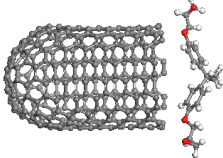
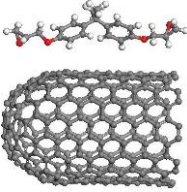
Для более широкого сравнительного рассмотрения рациональных типов НМК выполнено компьютерное моделирование в оригинальном пакете квантово-механических программ ИПРИМ РАН (свидетельство о государственной регистрации № 2009614949 от 10.09.2009). В нем исследованы механизмы взаимодействия эпоксидной матрицы с поверхностью частиц основных типов УНК. Результаты моделирования в виде значений энергии связывания $E_{связ}$ (на одну мономерную единицу эпоксидного клея) и максимальная сила сдвигового трения $F_{сдв_тах}$ даны в таблице 2.

Видно, что наиболее высокие характеристики имеют nano-трубки с открытыми концами. Соотношения сил сдвигового трения для углеродных nano-трубок и частиц аморфного углерода подтверждаются выполненным расчетом модуля деформации и его экспериментальной оценкой (табл. 2).

Можно сделать вывод, что наиболее перспективными nano-углеродными компонентами являются nano-трубки с открытыми концами, которые образуются при разломе УНТ в процессе ультразвукового диспергирования. Именно они положены в основу дальнейших исследований.

На фотографии (Рис. 11) показан результат структуризации полимерного связующего за счет диспергирования в соответствии с разработанным способом диспергирования УНТ в составе авиационного эпоксидного клея (свидетельство о государственной регистрации на изобретение № 2500706 от 10 декабря 2013 г.).

Таблица 2 – Геометрические, энергетические и механические характеристики для эпоксидного олигомера ЭД-20 и кластеров, моделирующих частицы наполнителя.

Адсорбционный комплекс	Оптимизированная структура адсорбционных комплексов молекулы олигомера ЭД-20, моделирующего фрагмент эпоксидной цепи, и кластеров, моделирующих частицы наполнителей	R, А	E _{связ.} , ккал/моль	F _{сдв_МАХ} , ккал/моль·А
ЭД-20 + углеродная частица CN170		2.7	-14.2	19.2
ЭД-20 + фуллерен C240		2.8	-13.8	18.8
ЭД-20 + углеродная трубка C288 (9,9) адсорбция по открытому концу		2.5	-23.5	26.8
ЭД-20 + углеродная трубка C288 (9,9) адсорбция по боковой стороне		2.7	-15.4	22.7

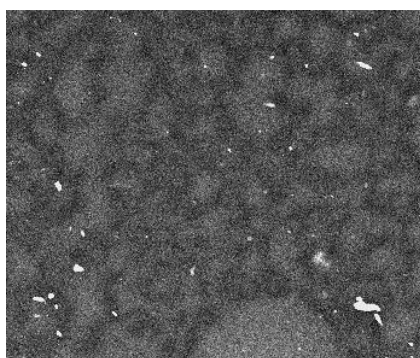
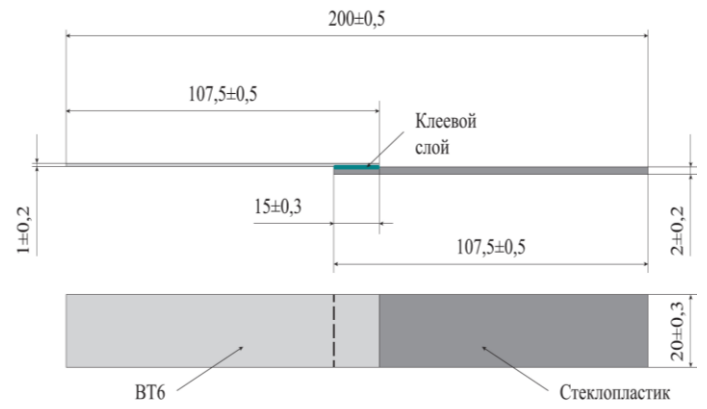
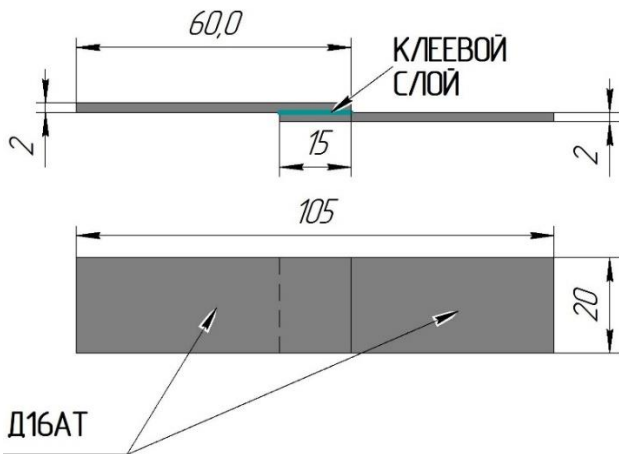


Рисунок 11 – Изображение поверхности нано-модифицированной клеевой композиции с диспергированными УНТ

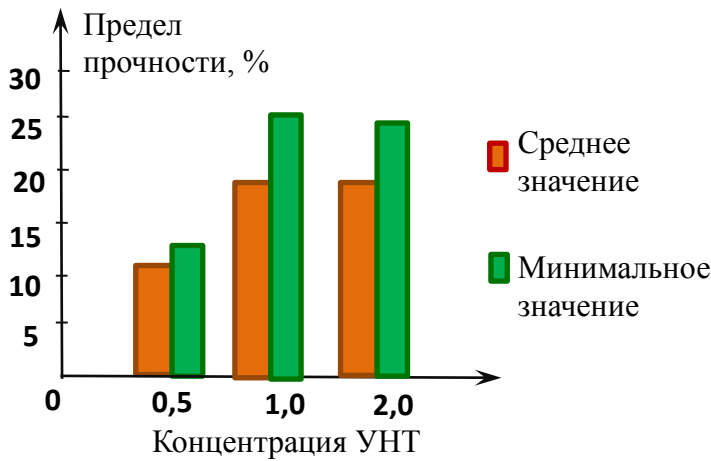
Для оценки механических характеристик разработанной НМК проведены стандартизованные испытания на сдвиг (по ГОСТ 14756-69) образцов клеевых соединений (Рис. 12). В результате установлено, что модуль упругости, твердость, вязкость, а также предельные сдвиговые напряжения повышаются в среднем на 20-30% (Рис. 13а). Важным практическим результатом нано-модифицирования является повышение теплостойкости НМК по сравнению с базовой клеевой композицией (рис. 13б).



а) Схема образца для испытания клеевого соединения элементов из сплава Д16АТ.

б) Схема образца для испытания клеевого соединения элементов из стеклопластика и титанового сплава.

Рисунок 12 – Схема образцов для испытания клеевых соединений (ГОСТ 14756-69)



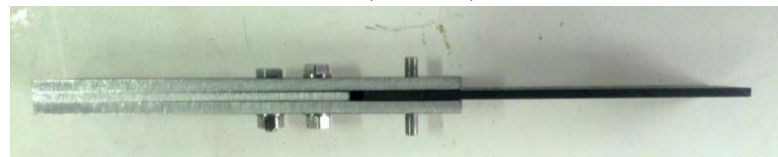
а) при различных концентрациях УНТ



б) при повышенной температуре - 80°C

Рисунок 13 – Повышение предела прочности при сдвиге

На методических образцах выполнено предварительное исследование влияния НМК на прочность и ресурс для одноточечного соединения (Рис. 14).



а) вид сбоку



б) вид сверху

Рисунок 14 – Фотоизображение образца из углепластика, соединенного штифтом со сборно-разборной вилкой

Результаты испытаний одноточечного металло-композитного соединения показали, что для образцов с комбинированной укладкой волокон прочность увеличилась в среднем на 20.0%, а усталостная долговечность более чем в 4 раза.

Оценка упрочнения кромки получена для образца, моделирующего фрагмент стенки нервюры крыла, изготовленного из углепластика толщиной 2,2 мм, с вырезом в виде отверстия диаметром 80 мм (рис.15). На рис.16 показаны микродефекты на кромке отверстия изготовленного образца (рис. 16а) и после нанесения упрочняющего слоя 0.03мм НМК (Рис. 16б). У исходного образца разрушение, начавшееся с кромки отверстия, произошло при нагрузке $P=1.9\text{т}$; для образца с упрочненной кромкой - $P=2.5\text{т}$, т.е. на 30% выше, кромки остались неповрежденными (Рис.17). Расслоение произошло вне кромки, в теле образца.

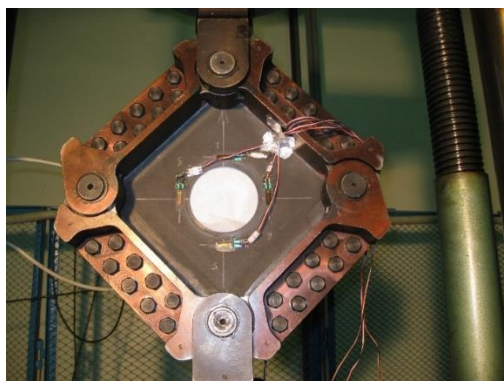
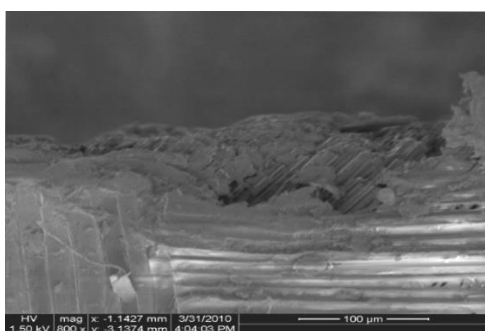
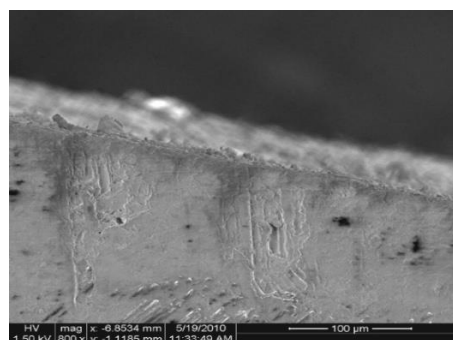


Рисунок 15 – Фотоизображение образца из углепластика, моделирующего фрагмент стенки нервюры крыла, в приспособлении для испытаний.



а) Кромка отверстия после изготовления

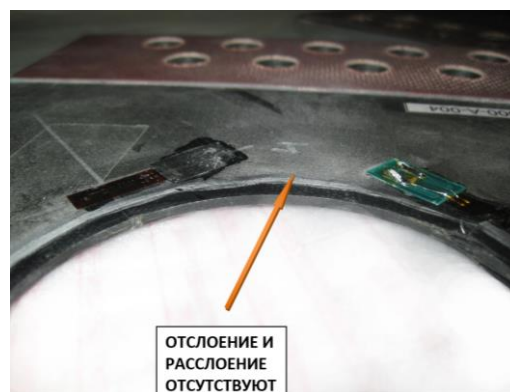


б) Кромка с нанесенной упрочняющей наноклеевой композицией

Рисунок 16 – Кромки детали из ПКМ после механической обработки и с упрочнением



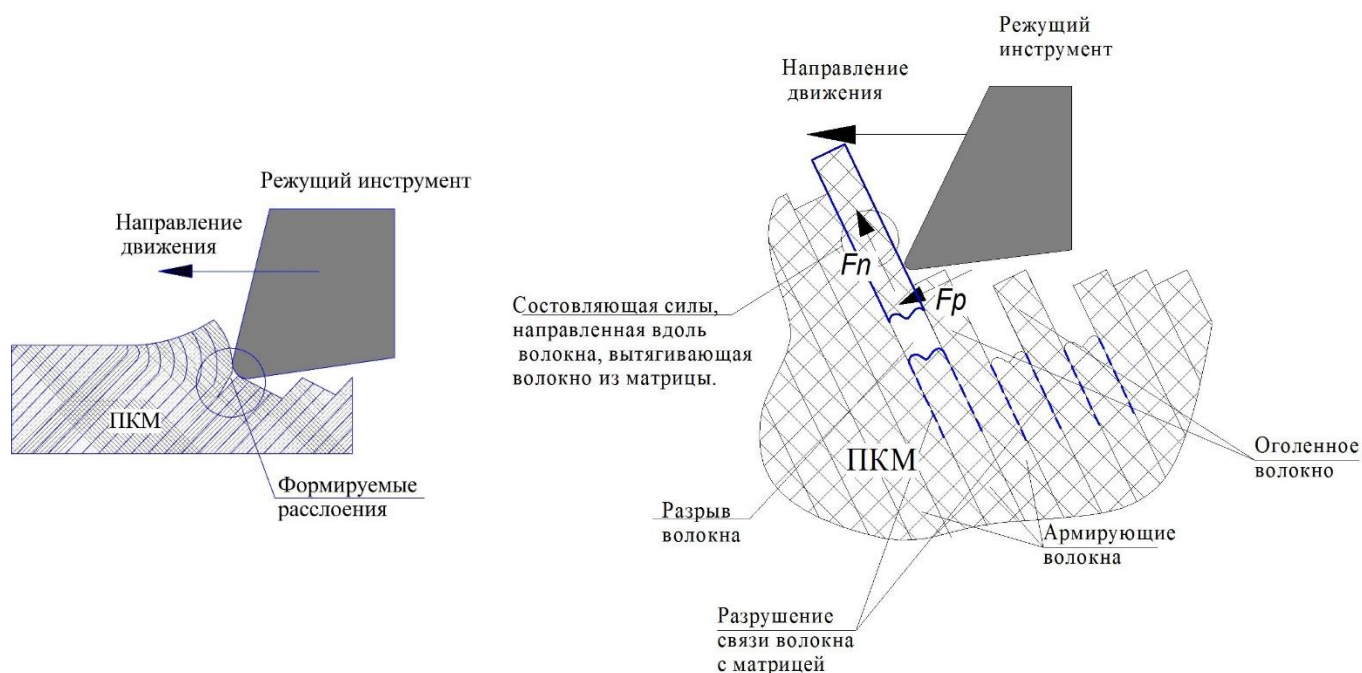
а) Исходный



б) С упрочненной кромкой отверстия

Рисунок 17 – Образец после испытаний на потерю устойчивости при сдвиге

В третьей главе исследуется влияние основных технологических параметров механической обработки (фрезерование, сверление) на её качество. Оно прежде всего определяется структурой ПКМ, полимерной матрицей с углеродным наполнителем в виде волокон и тканей. Характерные дефекты образуются как за счет частичного отслоения затупленным инструментом, так и сколов полимерного связующего наряду с ограниченным вытягиванием волокон наполнителя из матрицы до их разрушения (Рис. 18).



а) формирование расслоение в ПКМ

в) вытягивание волокон

Рисунок 18 – Формирование внутренних повреждений в ПКМ при обработке

Повреждения зависят от угла укладки волокон по отношению к направлению фрезерования и остроты режущей кромки используемого инструмента.

Для выбора рационального инструмента и технологических режимов обработки проводилась тестовая обработка с измерением сил резания и оценкой повреждаемости обработанной поверхности. Для оценки повреждаемости в зависимости от направления укладки волокон наполнителя фрезерование производилось по специальным спиральным траекториям (Рис. 19).

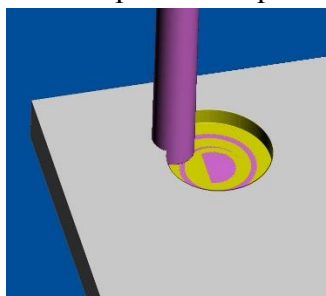
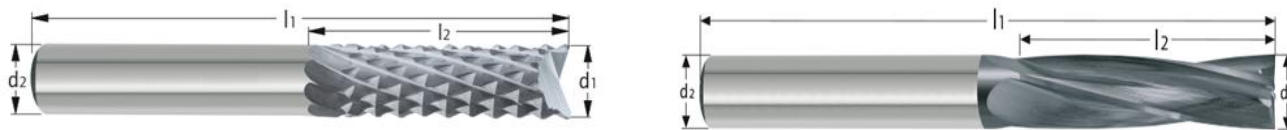


Рисунок 19 – Спиральная траектория движения инструмента при обработке карманов

Установлено, что применение алмазных вставок существенно повышает ресурс инструмента, однако уступает по качеству обработки твердосплавным фрезам с острыми кромками. Для сравнительной оценки производительности, ресурса и качества обработки использовались эталонные прямолинейные траектории.

Установлена высокая производительность при достаточном ресурсе фрез типа «роутер» с многозубой режущей кромкой (рис. 20а) за счет благоприятных условий отвода снятого материала и лучшего охлаждения, а также ограниченной площади воздействия каждого зуба. Однако обработанная поверхность характеризуется большими повреждениями, чем для гладкой режущей кромки (рис. 20б).



а) Фреза роутерного типа для черновой обработки кромок

б) Фреза для чистовой обработки кромок

Рисунок 20 – Фрезы для черновой и чистовой обработки ПКМ

По результатам исследования может быть рекомендована, как наиболее эффективная, фреза с комбинацией режущих кромок типа «роутер» для производительной обработки и гладких для зачистки обрабатываемой поверхности (Рис. 21).



Рисунок 21 – Инструмент, включающий зубцы для черновой и чистовой обработки

Сверление отверстий в узлах соединений может выполняться как на станках, так и ручным инструментом. В последнем случае важное значение приобретает исключение пылеобразования, которое может обеспечиваться подачей смазывающей охлаждающей жидкости (СОЖ). Для оценки влияния подачи СОЖ на качество кромок отверстий выполнялось измерение величины осевой силы. Установлено, что при сверлении с применением СОЖ сила резания превышает характерную без его применения и растет с увеличением скорости. Типичные значения сил приведены на рис. 22.

Влияние СОЖ на повреждения при входе и выходе сверла не замечено.

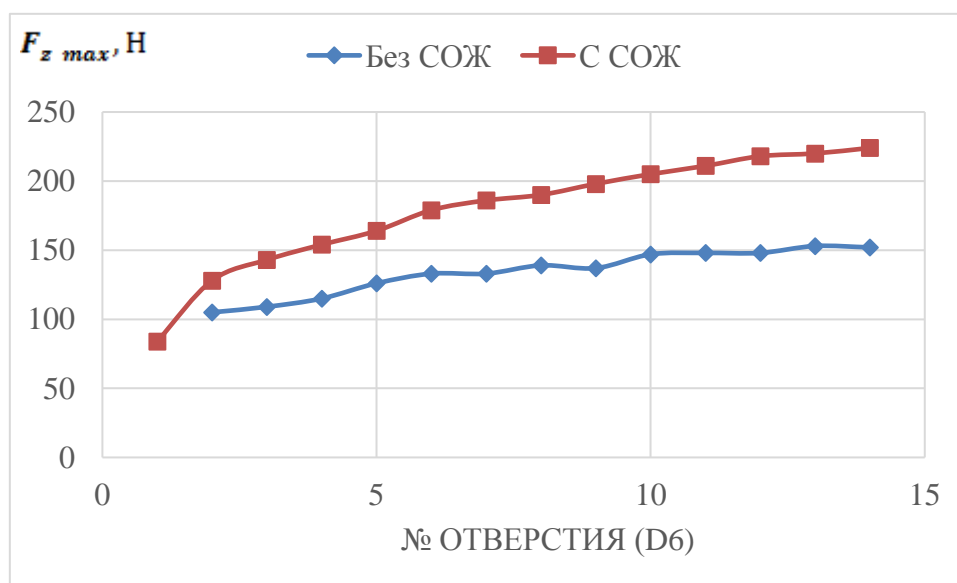


Рисунок 22 – Зависимость вертикальной силы резания при сверлении

Повышение осевой силы определяется вытеснением СОЖ к периферии вращением сверла, что создает дополнительное гидравлическое усилие на сверле и стенках отверстия. Повышение частоты вращения сверла при росте силы приводит к определенному расслоению ПКМ на стенках отверстий. Дополнительно удаляемый материал (крошка из связующего и углеродного наполнителя), смешиваясь с СОЖ, образует эмульсию с высокими абразивными свойствами. Ускоренное изнашивание сверла иллюстрирует зависимость осевой силы от числа изготовленных отверстий (Рис. 23). Видно, что по сравнению с сухим сверлением наблюдается больший рост осевой силы.

Еще одним контролируемым параметром, ограничивающим частоту вращения инструмента и его подачу, становится температура в зоне резания, распределение которой показано на (Рис. 23).

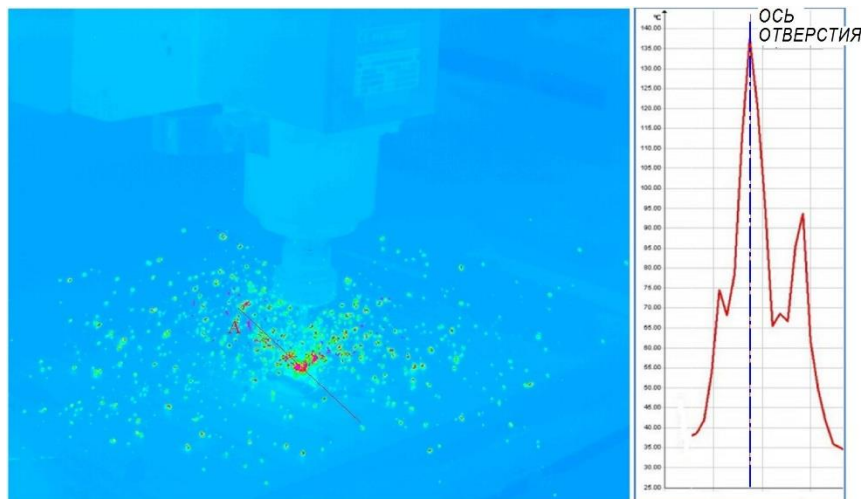


Рисунок 23 – Термограмма и распределение температуры вблизи оси отверстия при его изготовлении с применением фрезы

Сформулированные технологические рекомендации по проведению механической обработки с повышенным качеством использованы нами при изготовлении методических и конструктивно-подобных образцов для оценки повышения прочностных и ресурсных характеристик соединений, а также они нашли применение при изготовлении образцов вырезаемых из агрегатов натуральных авиационных конструкций самолетов для зонной оценки прочностных характеристик.

В процессе квалификационных статических испытаний изготовленных элементарных образцов в количестве более 2000 шт. было установлено, что за счет применения разработанных рекомендаций по механической обработке деталей из ПКМ коэффициент вариации их прочностных характеристик снизился с 7% до 4%.

В четвертой главе рассмотрены проведенные экспериментальные исследования повышения прочности и ресурса соединений деталей металло-композитных авиационных конструкций и при их ремонте на конструктивно-подобных образцах с применением разработанной НМК.

Разработаны конструктивно-подобные образцы, удовлетворяющие требованиям прочностного эксперимента. В образцах предусмотрено разрушение композитной детали при статическом или циклическом знакопеременном нагружении. Параметры образцов соединений определялись в проектировочном расчете для известных упруго-прочностных характеристик тонкостенных элементов конструкций из композиционного материала.

Допущения, принятые в расчете.

1. Укладка многослойного пакета заменена в расчетной модели на приведенную трехслойную (Рис. 24).

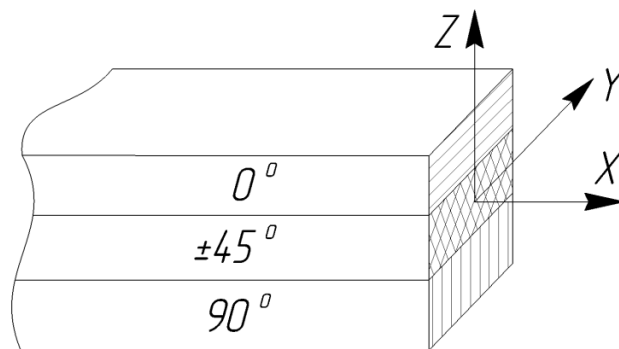


Рисунок 24 – схема укладки трехслойной модели пакета

2. Нагрузка распределяется по слоям пропорционально их жесткостям на растяжение и сжатие.

Суммарные характеристики панели определяются следующими соотношениями:

$$\sigma_{11\Sigma(\text{пакета})} = \sigma_{11\Sigma(Y)} \cdot \bar{n}(Y) + \sigma_{11\Sigma(C)} \cdot \bar{n}(C);$$

$$\sigma_{22\Sigma(\text{пакета})} = \sigma_{22\Sigma(Y)} \cdot \bar{n}(Y) + \sigma_{22\Sigma(C)} \cdot \bar{n}(C);$$

$$\tau_{12\Sigma(\text{пакета})} = \tau_{12\Sigma(Y)} \cdot \bar{n}(Y) + \tau_{12\Sigma(C)} \cdot \bar{n}(C);$$

$$E_{11\Sigma(\text{пакета})} = E_{11\Sigma(Y)} \cdot \bar{n}(Y) + E_{11\Sigma(C)} \cdot \bar{n}(C);$$

$$E_{22\Sigma(\text{пакета})} = E_{22\Sigma(Y)} \cdot \bar{n}(Y) + E_{22\Sigma(C)} \cdot \bar{n}(C);$$

$$\frac{1}{G_{12\Sigma(\text{пакета})}} = \frac{\bar{n}(Y)}{G_{12\Sigma(Y)}} + \frac{\bar{n}(C)}{G_{12\Sigma(C)}};$$

$$V_{12\Sigma(\text{пакета})} = V_{12\Sigma(Y)} \cdot \bar{n}(Y) + V_{12\Sigma(C)} \cdot \bar{n}(C),$$

где индекс Y- соответствует углепластику, C – стеклопластику.

Проведена оценка прочности образцов:

смятие: $P = d \cdot t \cdot \sigma_{см}$,

срез: $P = 2[(e/d) - 0,5] \cdot d \cdot t \cdot \sigma_{ср}$,

разрыв: $P = 2[(s/d) - 0,5] \cdot d \cdot t \cdot \sigma_p$,

где: P – разрушающее усилие болтового соединения, $\sigma_{см}$ $\sigma_{ср}$ σ_p – допускаемые напряжение на смятие, срез и растяжение соответственно, d – диаметр, t – толщина композитной накладки, e и s – линейные размеры (см. рисунок 25).



Рисунок 25 – Формы разрушения композитных соединений

Для определения эффективности применения НМК были проведены экспериментальные исследования изготовленных конструктивно подобных образцов многорядных металло-композитных соединений (Рис.26).

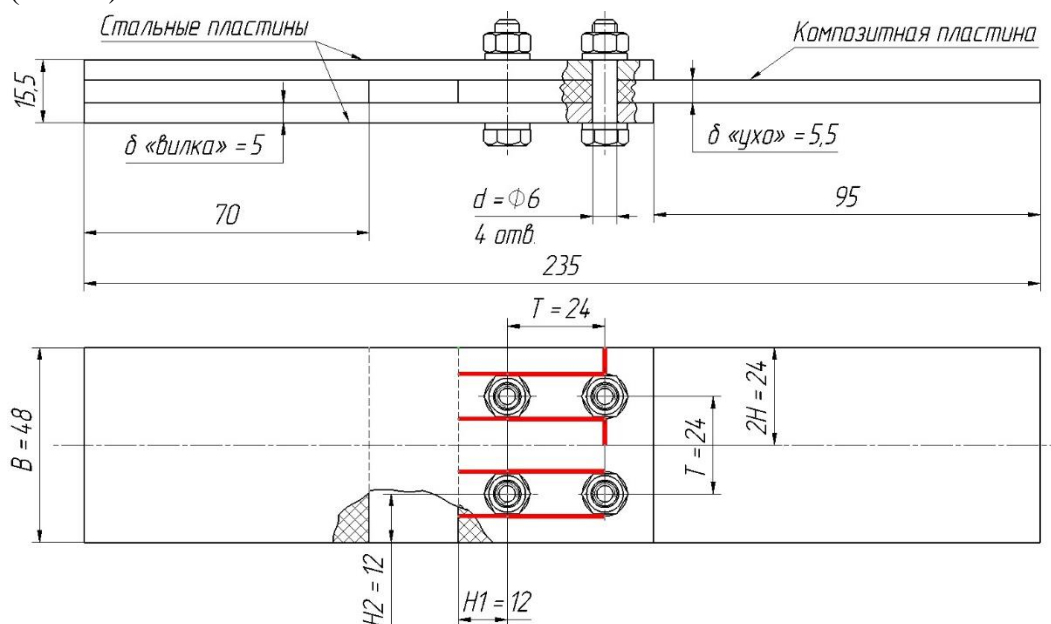


Рисунок 26 – Конструкция металлокомпозитного соединения

Для рассчитанных конструктивно-подобных образцов металло-композитных соединений было определено значение рационального предварительного затяжки болтов, уменьшающей изгиб при воздействиях со стороны детали из ПКМ (рис. 27).

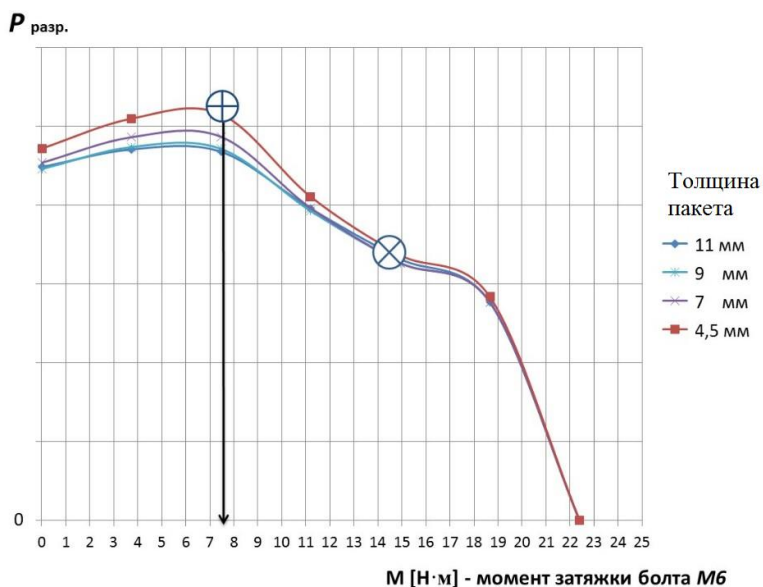


Рисунок 27 – Разрушающая нагрузка от растяжения одноточечного соединения типа «Ухо-вилка» в зависимости от момента затяжки болта (d=6мм)

Установлено, что при выполнении технологических рекомендаций по изготовлению отверстий в ПКМ за счет применения НМК усталостная долговечность увеличилась не менее чем в 6 раз, а прочность при растяжении - в среднем на 23%.

Исследовались низкоэнергетические (≤ 50 Дж) повреждения подлежащие ремонту, объем которых составляет более 70% от повреждений авиационных конструкций в эксплуатации. В экспериментальных исследованиях эффективности ремонта рассматривались панели с характерной толщиной 3.0-6.0мм. Соответствующий размер повреждений, по выборке деградировавшего

материала составляет 30.0-50.0мм. Сопоставлялись типовой ремонт с усиливающей металлической накладкой на механическом крепеже (заклепки, болты) без НМК с герметиком, выполненный в заводских условиях; с НМК (заменяющей герметик); без накладки с вклеиваемой послойно вставкой из композиционного материала.

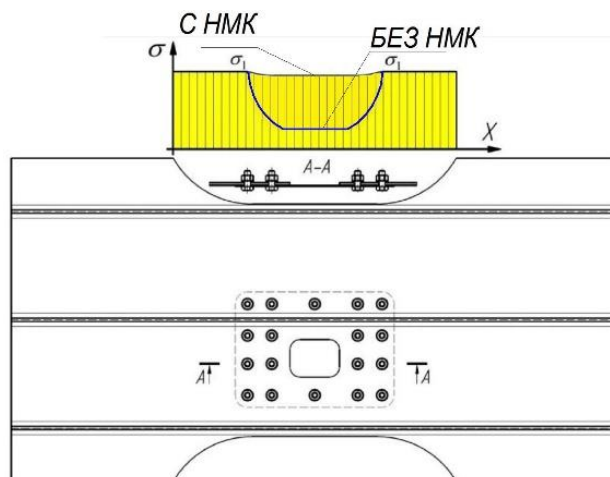


Рисунок 28 – Эпюра действующих напряжений в отремонтированной зоне

На рисунке 28 по результатам измерений системой из тензодатчиков, расположенных на поверхности образца, построены распределения приведенных напряжений в усиливающей металлической накладке без НМК и при его использовании для наклейки накладок и заполнения зазоров между соединительными элементами и отверстиями. Из распределения видно, что накладка включается в работу, уменьшаются напряжения в детали вокруг повреждения.

Анализ типовой конструкции с накладкой показывает, что при возможном одностороннем ремонте выходящих на поверхности агрегатов она искажает их обводы.

Нами предложено использовать раздвижную металлическую вставку с отбортовкой, не выступающую более чем на допустимые 0.5мм за обводообразующую поверхность (Рис. 20), устанавливаемую после выборки поврежденного материала с нормированным натягом и наномодифицированной клеевой композицией (Рис. 29).

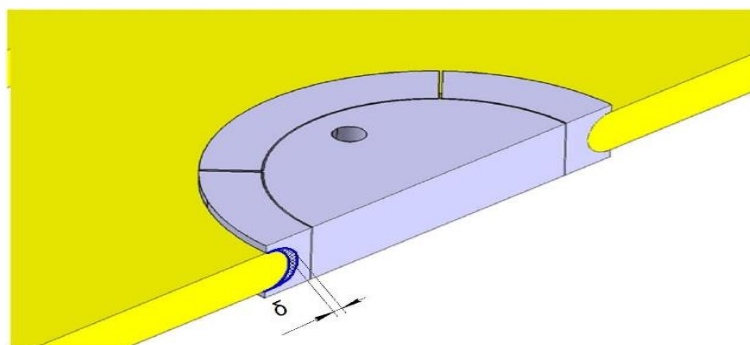


Рисунок 29 – Схема ремонта образца

Для оценки величины натяга разработан способ, основанный на широко используемых в инженерной практике критериев разрушения Мизеса-Губера, Цая-Хилла и максимальных напряжений.

Критерий Мизеса-Губера :

$$A = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6 \cdot (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)}{[\sigma_{11}]^2}};$$

Критерий Цая-Хилла:

$$A = \sqrt{\frac{\sigma_{11}^2}{[\sigma_{11}]^2} - \frac{\sigma_{11} \cdot \sigma_{22}}{[\sigma_{11}]^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{[\sigma_{22}]^2} + \frac{\tau_{12}^2}{[\tau_{12}]^2}};$$

Критерий максимальных напряжений:

$$A = \max\left(\frac{\sigma_{11}}{[\sigma_{11}]}, \frac{\sigma_{22}}{[\sigma_{22}]}, \frac{\tau_{12}}{[\tau_{12}]}\right), \text{ где } [\sigma_{11}], [\sigma_{22}], [\tau_{12}] - \text{ предельные прочностные характеристики материала}$$

образца; $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$ – компоненты тензора напряжений полученные из расчетной модели.

Условием целостности панели является: $A \leq 1$.

В соответствии с критериями на рисунке 30 представлены результаты расчета максимального разрушающего напряжения по сечению $\sigma = P/(H \cdot B)$ от величины натяга δ .

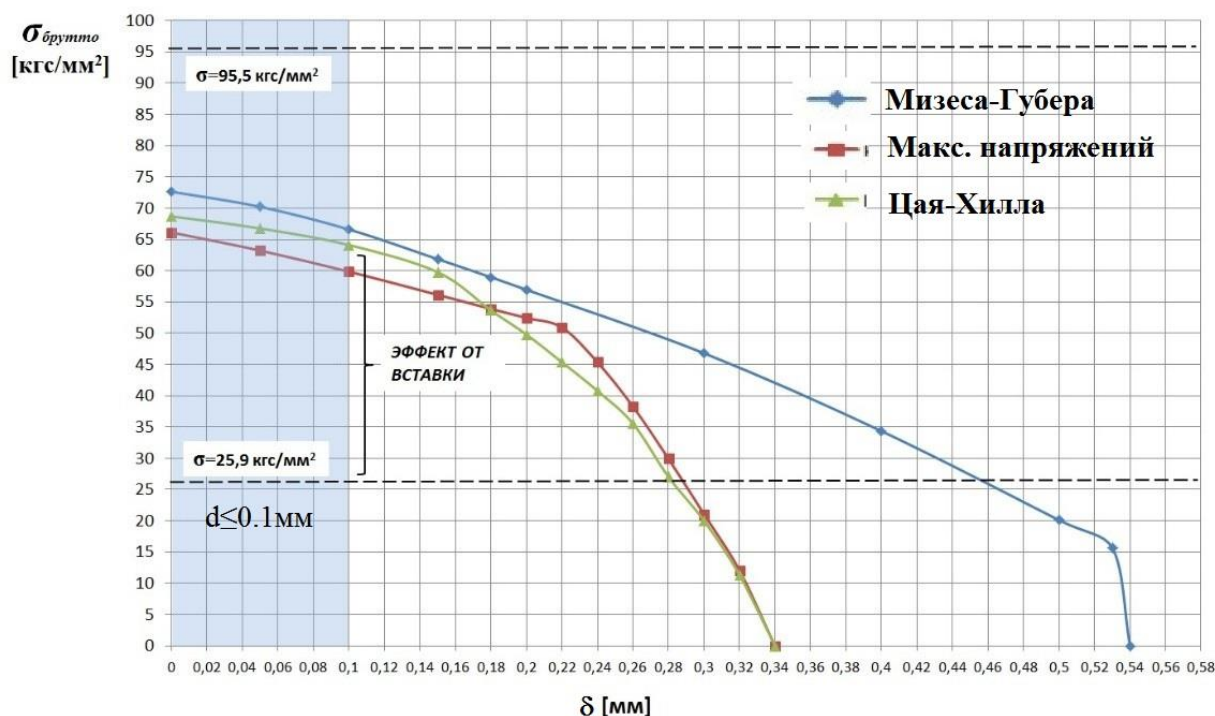


Рисунок 30 – Результаты расчета в напряжениях σ [кгс/м]

На графике выделена зона, соответствующая максимальной величине разрушающих напряжений для образца, причем в ней значения по трем рассмотренным критериям прочности близки. Уточнение величины натяга δ и критические значения разрушающих напряжений можно дополнительно скорректировать в зависимости от обуславливаемой натягом концентрации напряжений. Они задаются зависимостью (Сироткин О.С., Гришин В.И. Литвинов В.Б):

$$\frac{\delta}{R} = 2K \left\{ \left[\left(\frac{1}{2G} + k \right) \sin \bar{\omega} e^{-\sqrt{3} \left(\frac{\pi}{2} - \bar{\omega} \right)} - k \right] \cos \left(\bar{\omega} - \frac{\pi}{6} \right) - \left(\frac{1}{2G} + k \right) \sin \bar{\omega} e^{-\sqrt{3} \left(\frac{\pi}{2} - \bar{\omega} \right)} \frac{\cos \bar{\omega}}{\sqrt{3}} \right\}$$

где: $K = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$, $\sigma_r = \frac{2}{3} K \cos \left(\bar{\omega} + \frac{\pi}{6} \right)$, $\sigma_\theta = \frac{2}{3} K \cos \left(\bar{\omega} - \frac{\pi}{6} \right)$, G-модуль сдвига, $\bar{\omega}(R) = \bar{\omega}$, $k=1/3E$,

σ_s - пределы текучести нормальных напряжений, R – радиус вставки.

Для исследуемых образцов рациональная величина натяга $\delta = 0.4-0.5$ мм.

В результате проведения экспериментальных исследований получены значения разрушающих напряжений для рассмотренных видов ремонта, представленные на диаграмме, рис.31.

Предложенный способ ремонта обеспечивает наиболее высокие характеристики статической прочности и восстанавливает жесткость отремонтированной детали. Экспериментально на конструктивно-подобных образцах (Рис. 32) показано восстановление несущей способности поврежденных образцов до 90-95%. Результаты измерений поверхностных деформаций на исходном образце и на отремонтированном показали, что потеря несущей способности в зоне обшивки происходит при одинаковых напряжениях (деформациях). Также обеспечивается возможность ремонта вне заводских условий при одностороннем доступе к повреждению с допустимым выступанием над обводообразующей поверхностью 0.5мм.

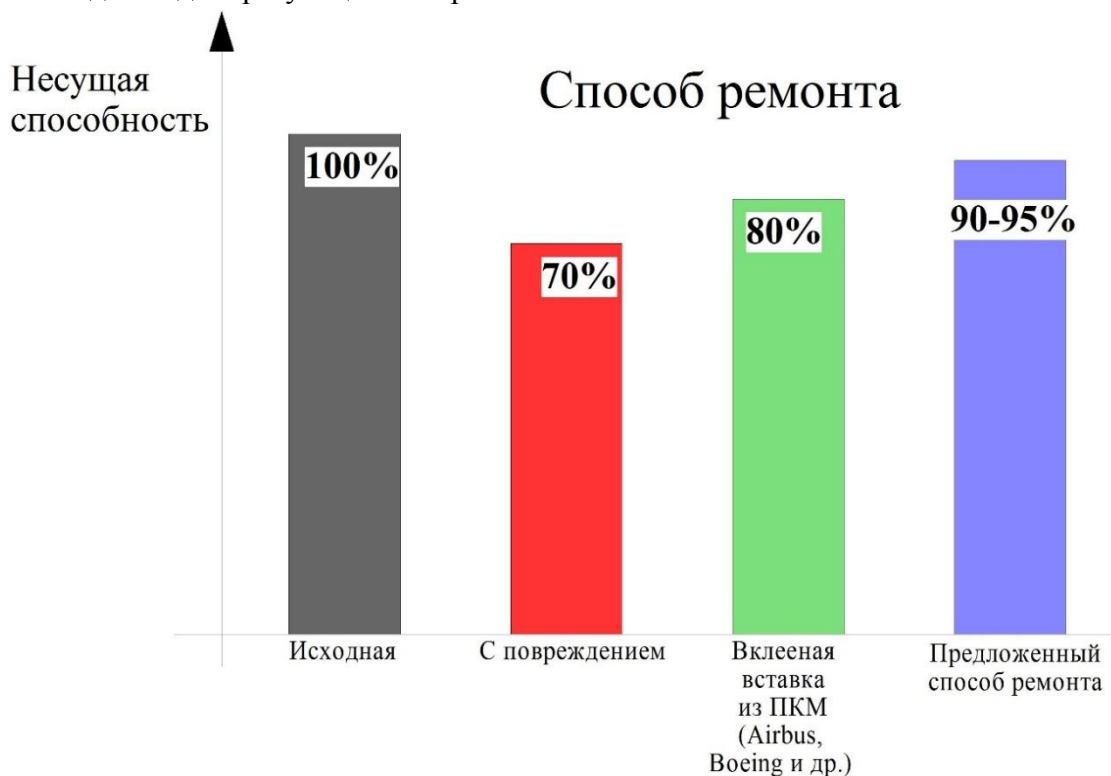


Рисунок 31 – Несущая способность двухстрингерной панели при одноосном сжатии



Рисунок 32 – Образцы с произведенным ремонтом, вид со стороны стрингеров

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1- Разработана методика повышения несущей способности конструкций из полимерных композиционных материалов и продления их ресурса на основе повышения качества механической обработки деталей из ПКМ и применения упрочняющей нано-модифицированной клеевой

композиции. Достижимое повышение статической прочности и ресурса узлов соединений, включая восстановительный ремонт низко энергетических ударных повреждений экспериментально подтверждено на методических и конструктивно-подобных образцах.

2- Выявлены факторы, определяющие снижение прочности и ресурса соединений и восстановительного ремонта деталей из ПКМ, в том числе установлена взаимосвязь прочности и ресурса соединений деталей из ПКМ с технологическими параметрами лезвийной механической обработки (сверление, фрезерование) и вызываемых ей кромочными повреждениями, а также зазорами между соединительными элементами и отверстиями в узлах соединений, обуславливающими рост концентраций напряжений и неодновременное включение в восприятие действующих нагрузок; смятие кромок отверстий в деталях из ПКМ при контакте с закладными металлическими соединительными элементами, приводящее к их изгибу вместо расчетного среза, снижению прочности и долговечности при знакопеременных нагрузках.

3- Разработана технология механической обработки (фрезерование, сверление) деталей из ПКМ со сниженной повреждаемостью. Апробирование при проведении обработки на оборудовании с числовым программным управлением показало, что повышение качества обработки позволило снизить их коэффициент вариации прочностных характеристик с 7% до 4%.

4- Разработана эффективная нано-модифицированная клеевая композиция с повышенными механическими характеристиками и трещиностойкостью, обусловленными структуризацией клеевого компаунда при диспергировании в нем углеродных нано-трубок, способ диспергирования углеродных нано-трубок с формированием их разломов, повышающих их активность в структуризации клеевого компаунда (Свидетельство о государственной регистрации на изобретение «Способ диспергирования наночастиц в эпоксидной смоле» № 2500706). При структуризации образуются зоны уплотнения в клее, повышающие его прочность; границы зон уплотнения – препятствуют распространению трещин в клеевой композиции.

5- Проведение упрочнения поврежденных кромок деталей после механической обработки, устранение концентраций растягивающих и сжимающих напряжений в результате заполнения зазоров между соединительными элементами (болт, заклепка) и отверстием с использованием нано-модифицированной клеевой композиции, обеспечило повышение статической прочности деталей и их соединений на конструктивно-подобных образцах в среднем на 20%, а их усталостную долговечность не менее чем в 6 раз (Свидетельство о государственной регистрации на изобретение «Способ повышения прочности болтового метало-композиционного соединения» № 2607888).

6- Разработан способ ремонта низкоэнергетических ударных повреждений в деталях из ПКМ (в том числе при одностороннем доступе) с использованием раздвижной металлической вставки с отбортовкой, устанавливаемой после выборки поврежденного материала с нормированным натягом и обработкой нано-модифицированной клеевой композицией, позволяющий восстановить статическую прочность и жесткость отремонтированной детали, при этом не нарушается обводообразующая поверхность.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Титов С.А. Применение наномодифицированной клеевой композиции для повышения прочности и долговечности элементов конструкций из композиционных материалов / С.А. Титов, В.Д. Вермель, А.М. Доценко // Известия самарского научного центра российской академии наук. – 2012. – Том 14 номер 4(2). –С. 394–398.

2. Титов С.А. Сопоставление технологий обработки элементов конструкций из полимерных композиционных материалов / С.А. Титов, В.Д. Вермель, А.М. Доценко, Г.А. Корнилов, С.М. Наумов // Оборонная техника –2012. – №8–9. – С.57–61.
3. Титов С.А. О повышение прочности и ресурса металло-композиционных соединений при применении наномодифицированной клеевой композиции / В.Д. Вермель, С.А. Титов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Том 16 номер 1(5). – С. 1328 – 1330.
4. Титов С.А. Клеевая композиция с добавками углеродных наноматериалов для авиационных конструкций на основе полимерных композитов / С.А. Титов, В.Д. Вермель, Ю.В. Корнев, Е.А. Никитина // Учен. Зап. Казан. ун-та. Сер: Физ.-матем. науки. – 2015. – Т. 157, кн. 3. – С. 148–152.
5. Titov S.A. Evaluation of improving mechanical characteristics of epoxy binder after dispersing carbon nanotubes / V.D. Vermel, S.A. Titov, Yu. V. Kornev, P.E. Semenov, T. Yu/ Nagovitsyna, L.L. Chernyshev // Advanced materials & technologies – 2018, №4 – P. 5–15.

Полученные в процессе выполнения работы патенты:

1. Свидетельство о государственной регистрации на изобретение «Способ диспергирования наночастиц в эпоксидной смоле» № 2500706. Титов С.А. Вермель В.Д., Доценко А.М. и др. Дата государственной регистрации в Реестре изобретений Российской Федерации 10 декабря 2013 г.
2. Свидетельство о государственной регистрации на изобретение «Способ повышения прочности болтового метало-композиционного соединения» № 2607888. Титов С.А. Барышников О.Е., Вермель В.Д. Дата государственной регистрации в Реестре изобретений Российской Федерации 11 февраля 2017 г.

Другие публикации:

1. Титов С.А. О повышении прочности и ресурса металло-композитных соединений при применении нано-модифицированных клеев / Титов С.А., Вермель В.Д. // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития. – 2014. – С. 47–48.
2. Титов С.А. Повышение эффективности клеевой композиции для авиационных конструкций на основе полимерных композиционных материалов путем ее модификации наноматериалами на основе углерода / Титов С.А., Корнев Ю.В., Вермель В.Д. и др. // Механика и наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред. Успехи, проблемы, перспективы. – 2015. – С. 258–268.
3. Титов С.А. Клеевая композиция с добавками углеродных наноматериалов для авиационных конструкций на основе полимерных композитов / Титов С.А., Вермель В.Д., Корнев Ю.В., Никитина Е.А. // Сборник: XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, сборник докладов. –2015. – С. 3745–374.
4. Титов С.А. Сканирующая зондовая микроскопия эпоксидных композитов с графеновым наполнителем / Титов С.А., Валиев Х.Х., Корнев Ю.В. и др. // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред –2016. – С. 33–39.
5. Титов С.А. Свойства клеевой композиции, модифицированной углеродными наноматериалами, для авиационных конструкций на основе полимерных композитов / Титов С.А., Гуськов Д.В., Корнев Ю.В., Вермель В.Д. // Новые материалы – 2016. – С. 10-11.
6. Титов С.А. Наномодифицированная клеевая композиция для повышения прочности узлов соединений авиационных конструкций на основе полимерных композиционных материалов / С. А. Титов, В. Д. Вермель, Ю. В. Корнев, Е. А. Никитина, О. В. Бойко, С. В. Чиркунова // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения. – 2016. – М.: Рос. Акад. наук. – С. 488–497.
7. Титов С.А. Экспериментальные результаты восстановления прочностных характеристик конструктивно-подобных образцов авиационных конструкций из ПКМ с низкоэнергетическими

- ударными повреждениями / Титов С.А., Качарава И.Н. и др. // 15-я Международная конференция "Авиация и космонавтика". – 2016. – С. 196–197.
8. Titov S.A. Nanomodified adhesive composition for aeronautical structures based on polymer composite materials / Titov S.A., Vermel V.D., Kornev Y.V. et al. // American Journal of Applied Sciences. – 2016. – Т. 13. – № 3. – С. 267–275.
9. Титов С.А. Экспериментальная оценка эффективности разнообразных способов ремонта низкоэнергетических ударных повреждений конструкций из ПКМ / Титов С.А., Абашев О.В., Ампилогов А.Ю., Вермель В.Д., Наумов С.М. и др. // Труды ЦАГИ. – 2017. – Вып. 2764. – С. 53–56.
10. Титов С.А. Основные подходы к проведению расчетно-экспериментальных исследований, необходимых для обоснования эффективности ремонта силовых элементов из ПКМ планера самолета / Титов С.А., Абашев О.В., Ампилогов А.Ю., Вермель В.Д., М.В. Лимонин, Наумов С.М., Хазин Л.М. и др. // Труды ЦАГИ. – 2017. – Вып. 2764. – С. 259–260.
11. Титов С.А. Экспериментальный анализ способов ремонта низкоэнергетических ударных повреждений в авиационных конструкциях из ПКМ / Титов С.А., Вермель В.Д., Наумов С.М., Ампилогов А.Ю. и др. // Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья - основа инновационного развития экономики России (посвящается 85-летию со дня основания ФГУП «ВИАМ» - ведущего материаловедческого центра страны). – 2017. – С. 11.
12. Титов С.А. Проектировочный расчет упруго-прочностных характеристик тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов / Титов С.А., Гришин В.И., Качарава И.Н., Орлова О.А // Труды ЦАГИ. – 2018. – Вып. 2768. – С. 33–42.
13. Титов С.А. Влияние диспергирования углеродных нано-волокон с применением волновых процессов и ультразвука на изменение механических характеристик эпоксидного связующего / Титов С.А., В. Д. Вермель, Ю. В. Корнев, Т. Ю. Наговицына // Труды ЦАГИ. – 2018. – Вып. 2768. – С. 95–98.
14. Титов С.А. Проблемы обеспечения прочности и ресурса металло-композитных соединений и способ их решения при изготовлении аэродинамических моделей / Титов С.А., Вермель В.Д., Корнев Ю.В., Наумов С.М.В // Материалы III Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов, КИМИЛА. – 2018. – С. 217–223.
15. Титов С.А. Способ повышения прочности и ресурса металло-композитных соединений в авиационных конструкциях на основе применения наноклеевой композиции / С.А. Титов, В.Д. Вермель, Ю.В. Корнев // Сборник тезисов докладов VIII международной конференции «Композиты СНГ» – 2018. – С.27–33.
16. Титов С.А. Некоторые рекомендации по проведению ремонтно-восстановительных работ низкоэнергетических ударных повреждений в авиационных деталях из ПКМ / С.А. Титов, В.Д. Вермель, С.М. Наумов // Сборник тезисов докладов VIII международной конференции «Композиты СНГ» – 2018. – С.43–47.