

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный
аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., Вермель Владимир Дмитриевич

Жуковский – 2019

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение..... | 5 |
| Глава 1. Проблемы снижения прочности и ресурса металло-композитных соединений авиационных конструкциях, а также при проведении восстановительного ремонта ударных повреждений..... | 21 |
| 1.1 Кромочные повреждения деталей из ПКМ после формования при размерной механической обработке и в соединениях металло-композитных конструкций..... | 21 |
| 1.2 Анализ геометрических характеристик металло-композиционного болтового соединения конструктивно-подобного образца стыка агрегатов конструкции самолета | 27 |
| 1.2 Исследования условий нагружения соединений в металло-композитных конструкциях с закладными металлическими элементами..... | 31 |
| 1.3 Экспериментальная оценка эффективности клее-механического ремонта деталей из ПКМ..... | 37 |
| 1.4 Направления повышения прочности и ресурса деталей из ПКМ в соединениях и при восстановительном ремонте ударных повреждений..... | 39 |
| Выводы к главе 1 | 44 |
| Глава 2. Разработка nano-модифицированной клеевой композиции с повышенными прочностными характеристиками для упрочнения кромок деталей из ПКМ и повышения ресурса соединений..... | 45 |
| 2.1 Физические основы повышения прочности и трещиностойкости полимерной матрицы в результате диспергирования в ней углеродных nano-компонент... | 46 |
| 2.2 Nano-модифицированная клеевая композиция с повышенными характеристиками трещиностойкости (вязкости) для применения при упрочнении кромок деталей и отверстий после механической обработки, а также в узлах соединений металло-композитных авиационных конструкций и при их ремонте с применением усиливающей металлической накладки..... | 50 |

| | |
|---|-----|
| 2.3Выбор способа диспергирования и типа углеродных нано-модифицирующих компонентов..... | 63 |
| 2.4Выбор рациональной концентрации модифицирующего нано-материала | 69 |
| 2.5Экспериментальная оценка характеристик разработанной нано-модифицированной клеевой композиции. | 76 |
| 2.6 Предварительные результаты применения наномодифицированной клеевой композиции | 79 |
| Выводы к главе 2..... | 86 |
| Глава 3. Определение рациональных технологических параметров механической обработки деталей авиационных конструкций из ПКМ для уменьшения повреждений кромок лезвийным инструментом..... | 87 |
| 3.1Разработка технологии размерной фрезерной обработки отформованных деталей из ПКМ с минимизацией повреждения кромок | 88 |
| 3.2Разработка технологии изготовления проемов отформованных деталей из ПКМ с минимизацией повреждения кромок..... | 99 |
| 3.3Разработка технологии сверления отверстий в ПКМ | 120 |
| Выводы к главе 3..... | 133 |
| Глава 4. Экспериментальное исследование повышения прочности и ресурса соединений деталей металло-композитных авиационных конструкций и их ремонта на конструктивно-подобных образцах..... | 134 |
| 4.1Разработка и изготовление конструктивно-подобных образцов соединений с использованием упрочняющей нано-модифицированной клеевой композиции | 134 |
| 4.2Результаты испытаний образцов и их анализ | 155 |

| | |
|---|-----|
| 4.3Разработка технологии ремонта низкоэнергетических ударных повреждений деталей из ПКМ..... | 161 |
| 4.4Доработка клее-механического ремонта на основе применения наномодифицированной клеевой композиции..... | 195 |
| Выводы к главе 4..... | 203 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 205 |
| Список использованных источников | 207 |

Введение

Актуальность работы.

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. [1-8]. 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 и целого ряда других отечественных и зарубежных исследователей [9-14]. Проектирование конструкций крыла из ПКМ рассматривается в работах В.И. Гришина, В.В. Лазарева, Ю.П. Трунина и др. [41].

Исследованию соединений авиационных конструкций посвящены работы О.С. Сироткина, В.И. Гришина, В.Б. Литвинова, Кейта Т. Кедварда, Хъени Кима и др. [15-18]. 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. [18-22].

Влияния на механические характеристики ПКМ в авиационных конструкциях с учетом характерного для них знакопеременного нагружения, а также воздействия внешней среды, исследовались Е.Н. Кабловым, Ю.П. Труниным, Г.Н. Замулой и целым рядом других [23-25].

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. П. Давима, М. Делериса, А. Паолетта, Л. Санто, и других [26-33]. 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. [34-40].

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 [42-46]) делает актуальным исследования их применения для повышения характеристик авиационных конструкций из ПКМ.

В целом ряде работ, выполненных в России и за рубежом (Е.Н. Каблов, В.Д. Вермель, С.В. Кондрашев и др. [47-59]), 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 [60].

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 элементов, а также при проведении ремонта. Не исследовано возможное повышение прочности соединений деталей и агрегатов в авиационных конструкциях с учетом специфики их реализации, а также ремонта повреждений с использованием усиливающих металлических элементов.

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 наномодифицированной клеевой композиции с повышенными прочностными характеристиками;
- 4) Разработка эффективной наномодифицированной 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.

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 наномодифицированной 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 МЕТАЛО-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.

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 макроуровнях структуры полученных нано-модифицированных клеевых композиций, специализированный измерительный комплекс «NanoTest 600» (Micro Materials Ltd., Англия), позволяющий определять методом наноиндентирования механические свойства материалов в наномасштабе.

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 нанокомпонентов 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 метало-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 2011 года 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 метало-композиционного 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.

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 механической обработки после формования для придания им необходимых геометрических размеров, а также изготовления проемов и отверстий в узлах соединений. Другой проблемой является отсутствие плотных посадок металлических соединительных элементов в отверстиях соединяемых деталей из ПКМ. Возникающие зазоры могут образовываться, как в следствии излома кромок полимерных деталей при размещении с натягом в отверстиях существенно более твердых металлических закладных соединительных элементов, так и недостаточной точности изготовления отверстий включая возможное выкрашивание связующего и вырывы волокон армирующего наполнителя. При значительных статических и знакопеременных нагрузках разрушение деталей, как правило, начинается на поврежденных кромках.

Исследование нагруженных компонентов в соединениях показывает, что характерные для неплотных посадок зазоры между отверстиями и соединительными элементами приводят к высоким до 4-8 кратным концентрациям растягивающих и сжимающих напряжений. Возникающие, при контакте с закладными металлическими соединительными элементами кромок отверстия детали из ПКМ, разрушения приводят к замене традиционного для соединений

среза болта к его изгибу и потере прочности соединения с меньшими величинами нагрузок при ускоренном снижении ресурса в случае знакопеременного нагружения.

Повышение прочности может достигаться при устранении повреждений кромок за счет нанесения упрочняющего покрытия. Формирование плотных посадок, при снижении концентраций напряжений, может быть обеспечено за счет заполнения зазоров в соединениях клеевой композицией.

Важными требованиями к используемым клеевым композициям становятся повышенная прочность, определяемая действующими в соединениях напряжениями и вязкость, препятствующая трещинообразованию при знакопеременных нагрузках.

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

Анализ взаимодействия углеродных нано-компонент УНК таких как нанотрубки, нано-волокна, графен показывает, что их диспергирование в изотропной клеевой композиции приводит к ее структуризации за счет действия как водородных, так и Ван-дер-Ваальсовых дисперсионных сил. В результате структуризации изотропного клеевого компаунда формируются выраженные зоны уплотнения, что приводит к повышению прочности клеевой композиции, а границы зон уплотнения предотвращают распространение трещин в клеевом слое. Оценка активности УНК на структуризацию клеевой композиции показала, что в наибольшей степени она определяется открытыми концами УНТ, в том числе формируемыми при изломе в процессе диспергирования.

Вопросами, требующими решения, остаются – способ диспергирования УНК, обеспечивающий как излом углеродных нанотрубок, так и их равномерное распределение в клеевой композиции, а также рациональная объемная концентрация УНК в составе клеевой композиции. Важнейшим для применения создаваемой НМК является срок сохранения компаунда с диспергированными УНК до составления композиции при введении отвердителя по реализуемым прочностным характеристикам.

Проведены исследования по составлению клеевых композиций с различной концентрацией УНК и определение на их основе рационального вида УНК (нано-трубки, нано-волокна), а также их объемных концентраций в составе клеевой композиции. Выполнено экспериментальное определение прочностных характеристик НМК на стандартных методических образцах.

В третьей главе исследовано влияние основных технологических параметров механической обработки (скорость резания, определяемая скоростью вращения шпинделя и диаметром инструмента, подача температура в зоне резания, способы охлаждения зоны обработки и др.) на качество обработки. При оценке обработки рассматривались: размеры повреждений на обрабатываемых кромках со стороны входа инструмента и со стороны выхода; момент силы резания при сверлении и фрезеровании (для большего момента, при прочих равных, характерны более высокие внутренние повреждения); температура в зоне обработки, превышение которой приводит к охрупчиванию связующего.

Представлены экспериментальные результаты влияния применения смазывающей охлаждающей жидкости при сверлении отверстий в деталях из ПКМ.

Сформулированы технологические рекомендации по механической обработке деталей из ПКМ. Полученные рекомендации были апробированы при изготовлении целого ряда образцов для прочностных испытаний. В процессе испытаний было установлено, что коэффициент вариации 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, включая выбор рациональных параметров механической лезвийной обработки по сокращению повреждений кромок.

Представлены результаты комплексного применения разработанных рекомендаций по изготовлению отверстий, а также устранения дефектов на кромках в отверстиях, образующиеся после механической обработки, и заполнения зазоров между крепежным элементом (болтом) и отверстием, разработанной НМК

с повышенными механическими характеристиками. Для определения эффективности применения НМК были проведены экспериментальные исследования на двух типах конструкций металло-композитных соединений: одноточечное соединение для оценки влияния НМК на повышение прочности и ресурса за счет заполнения зазора между болтом и отверстием (обеспечение плотной посадки и снижения концентрации напряжений) и залечивание повреждений кромок после механической обработки; конструктивно подобные многорядные металло-композитные соединения, в которых заполнение зазоров между отверстием и болтом, обеспечивают также одновременное включение их в работу при нагружении.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при реализации технологических рекомендаций по изготовлению отверстий в ПКМ и применения НМК усталостная долговечность конструктивно-подобных образцов увеличивается не менее чем в 6 раз, а прочность при растяжении - в среднем на 23%.

Применительно к восстановительному ремонту, выполняемому с применением усиливающих накладок, установленных на поврежденных деталях, показано, что применение НМК обеспечивает равномерное распределение усилий на крепежные элементы, повышая прочность отремонтированной конструкции.

Предложен способ ремонта низкоэнергетических ударных повреждений в деталях из ПКМ с применением металлических вставок, устанавливаемых в детали после выборки поврежденного материала с нормированным натягом и наномодифицированной клеевой композицией.

Разработан расчетный метод оценки натяга на основе применения МКЭ по критериям разрушения Мизеса-Губера и Цая-Хилла.

Представлены результаты экспериментальных исследований при испытании на прочность при сжатии конструктивно-подобных образцов с проведенными ремонтно-восстановительными работами с применением разработанного способа ремонта низкоэнергетических ударных повреждений в изделиях из ПКМ металлической вставкой.

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.

Глава 1. Проблемы снижения прочности и ресурса металло-композитных соединений в авиационных конструкциях, а также при проведении восстановительного ремонта ударных повреждений

При изготовлении деталей и агрегатов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) их прочностные характеристики снижаются по сравнению с получаемыми при квалификационных испытаниях на методических образцах. В числе существенных факторов повреждения кромок при механической обработке после формования, а также изготовление необходимых конструктивных проемов в деталях и отверстий для соединений. Еще одним фактором, снижающим прочность и ресурс соединений, становятся зазоры между отверстиями и помещаемыми в них металлическими соединительными элементами.

Рассмотрим их детально.

1.1 Кромочные повреждения деталей из ПКМ после формования при размерной механической обработке и в соединениях металло-композитных конструкций

Необходимость проведения размерной обработки деталей из ПКМ после их формования и изготовление вырезов и отверстий под размещение металлических закладных элементов и крепежа в узлах соединения деталей приводит к повреждениям обработанной поверхности и кромок. Образующиеся дефекты типа микротрещин, ворсистости, сколов связующего, расслоений (рисунок 1.1) обуславливают ускоренное разрушение деталей при статических и циклических нагрузках.

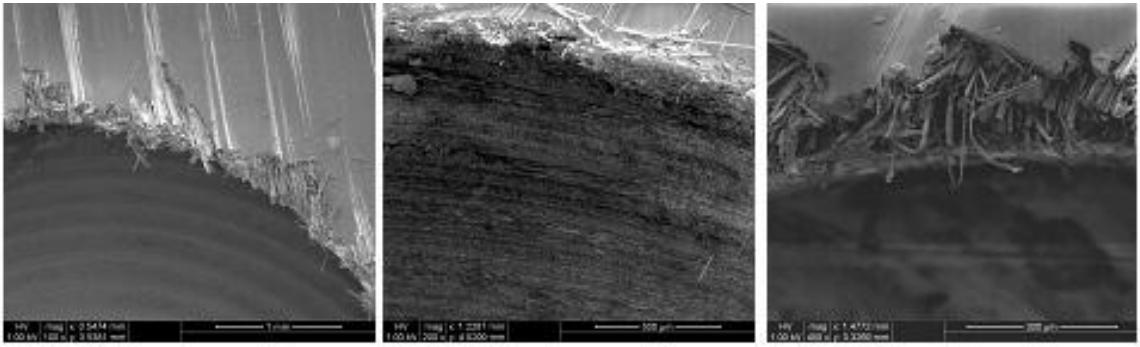


Рисунок 1.1 – Дефекты на кромках деталей из ПКМ, возникающие при механической обработке -фрезеровании и сверлении

Опыт изготовления деталей из ПКМ показывает, что все известные технологии обработки ПКМ – лазерная и гидроабразивная резка, а также механическая обработка (сверление, фрезерование, расточка) – приводят к возникновению дефектов (рисунки 1.2-1.3). При лазерной резке происходит испарение связующего, оголяются волокна наполнителя и появляются трещины шириной $\sim 0,1$ мм и длиной до нескольких миллиметров. Наряду с низкой экологичностью процесса (испарение связующего), потеря прочностных характеристик, низкая точность реза вследствие повреждения кромок не позволяют использовать серийные технологические лазеры при изготовлении деталей. Их применение потребует доработки системы газоудаления и обязательной дополнительной обработки кромок деталей в случае необходимости обеспечения требований к точности и прочности кромок, а также соединений с другими деталями.

В отличие от лазерной и гидроабразивной резки механическая обработка на фрезерных станках с ЧПУ является более универсальной, обеспечивая как обработку кромок, отверстий и валов, причем со ступенчатым изменением радиусов вдоль оси, так и поверхностей без ограничения геометрической сложности.

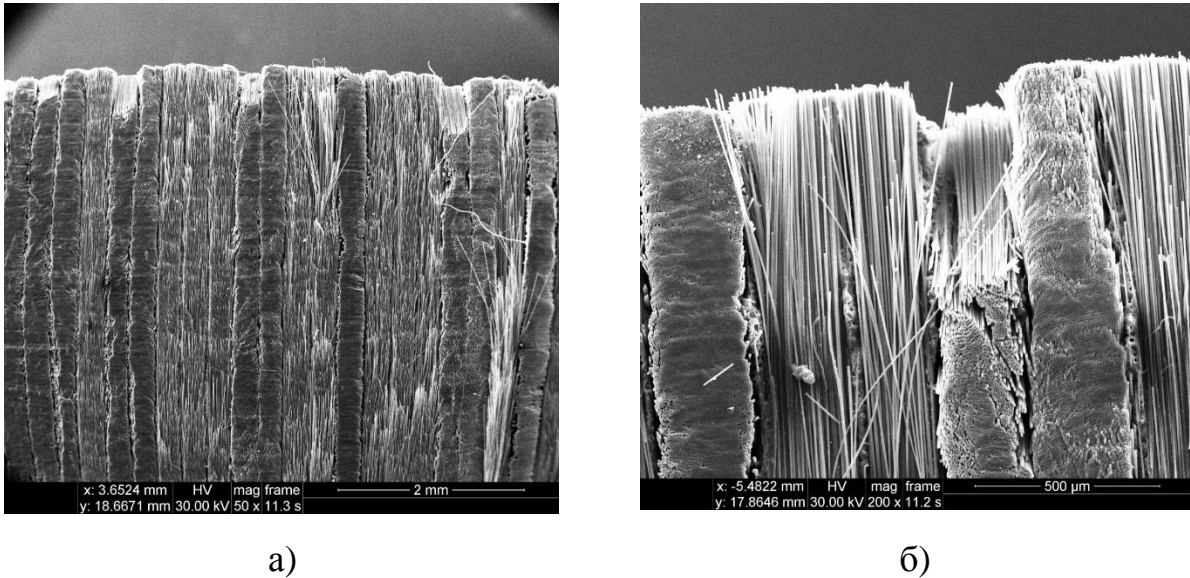


Рисунок 1.2 – Результат лазерной резки, при различном увеличении

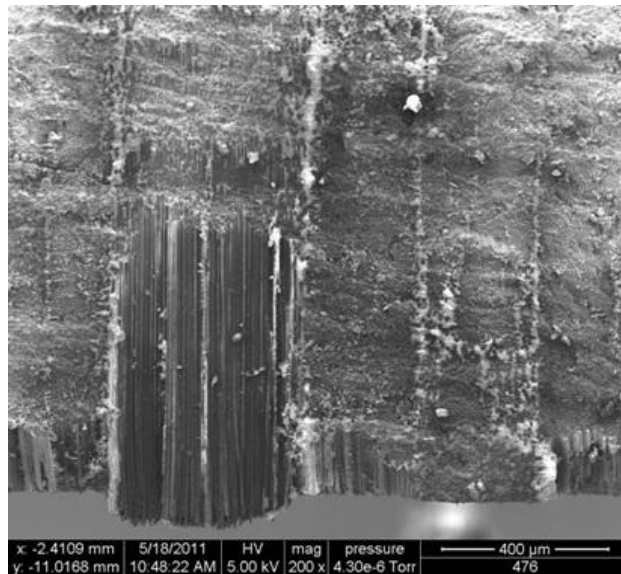


Рисунок 1.3 – Дефекты на краях деталей из ПКМ, возникающие при гидроабразивной обработке

Важным условием долговечности авиационной конструкции является плотная посадка металлических соединительных элементов (болт, заклепка) в отверстиях соединяемых деталей. Для деталей из композита существенно низкая, по сравнению с металлом, прочность полимерного связующего не позволяет непосредственно получить плотную посадку в отверстия металлических соединительных элементов, в частности и из-за повреждения кромок (рисунки 1.4-1.5).

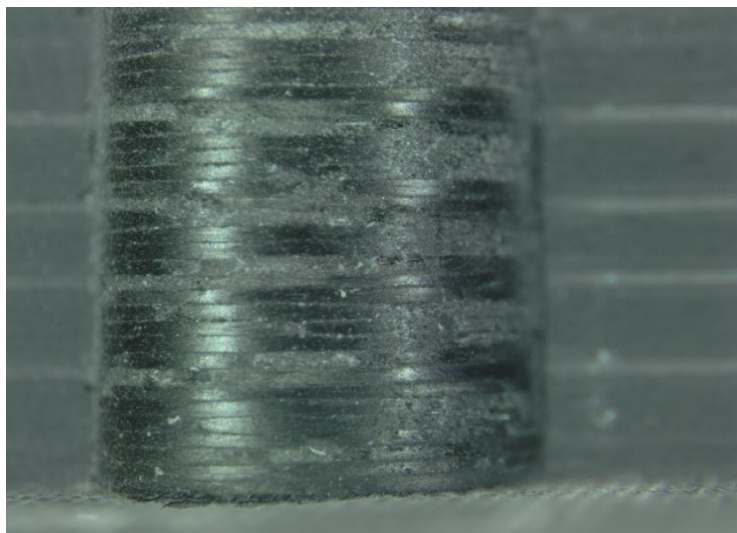


Рисунок 1.4 – Повреждения на обработанных сверлом кромках отверстий

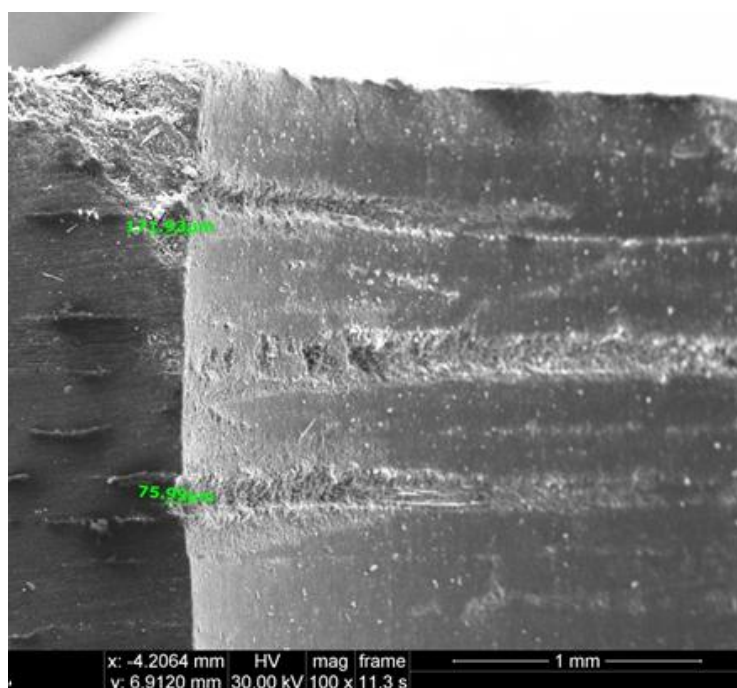


Рисунок 1.5 – Характерная глубина повреждений 0.1 мм на обработанных сверлом кромках отверстий

При этом дефекты, вызванные механической обработкой, обнаруживаются не только на обработанных кромках, но и проникают в виде расслоений на некоторую глубину внутрь детали. Это приводит к снижению прочности и жесткости деталей из ПКМ в зоне их обработки. Данные повреждения невозможно обнаружить визуально или при применении ультра-звукового контроля. Такие повреждения в виде межслоевых расслоений возможно обнаружить только под нагрузкой, при

которой происходит деформация слоистого композита. Одним из вариантов такого исследования является шерография. Шерография (от англ. *Shearography*, shear [ʃiəɹ] — сдвиг) или сдвиговая спекл-интерферометрия — это разновидность интерферометрических методов неразрушающего контроля (методов дефектоскопии), с помощью которой внутренние разрушения или дефекты компонентов могут быть определены посредством измерения и анализа поверхностных деформаций. Деформации образуются как ответная реакция внутренней структуры на некоторую внешнюю незначительную нагрузку. Накладывая показываемые изображения объекта в ненагруженном состоянии с изображением, взятым в нагруженном состоянии, можно определить изменение любой заданной точки изображения.

На рисунке 1.6 представлено изображение, полученное методом шерографии, зоны с обнаруженными повреждениями в виде расслоений вокруг обработанного отверстия. По результатам шерографии, представленных на рисунках, определены зоны, получившие повреждения в результате гидроабразивной резки и механической обработки. По фотоизображениям, полученным в процессе шерографии, было установлено, что микроповреждения при гидроабразивной вырезке распространяются на ~ 14-14.5 мм от отверстия, а при механической обработки – 9.0 мм.

Испытания на прочность при сдвиге образцов из углепластика, имитирующих фрагмент стенки нервюры крыла самолета (углепластик фирмы Hexcel, изготовитель ООО «ИРИСМАШ», Воронеж), толщина образцов 6,5 мм, и отверстием диаметром 60.0мм, показали, что, в зависимости от технологии обработки, их прочность при сдвиге может отличаться более чем на 15%. В таблице 1.1 приведен перечень образцов, варианты технологии их изготовления и результаты их испытаний.

Таблица 1.1 – Результаты испытаний на прочность при сдвиге образцов из углепластика с отверстием, изготовленным механической и гидроабразивной вырезкой

| Способ изготовления отверстий | Значения нагрузок при испытаниях, Н | | Особенности разрушения |
|---|-------------------------------------|----------------|---|
| | В начале растрескивания | При разрушении | |
| Механическая вырезка с применением резца | 245000 | 270000 | Две продольные трещины со ступенчатым изменением траектории и две короткие изогнутые поперечные трещины |
| Гидроабразивная вырезка с последующим осушением образца | 206000 | 231000 | Две продольные прямолинейные трещины и две короткие изогнутые поперечные трещины |

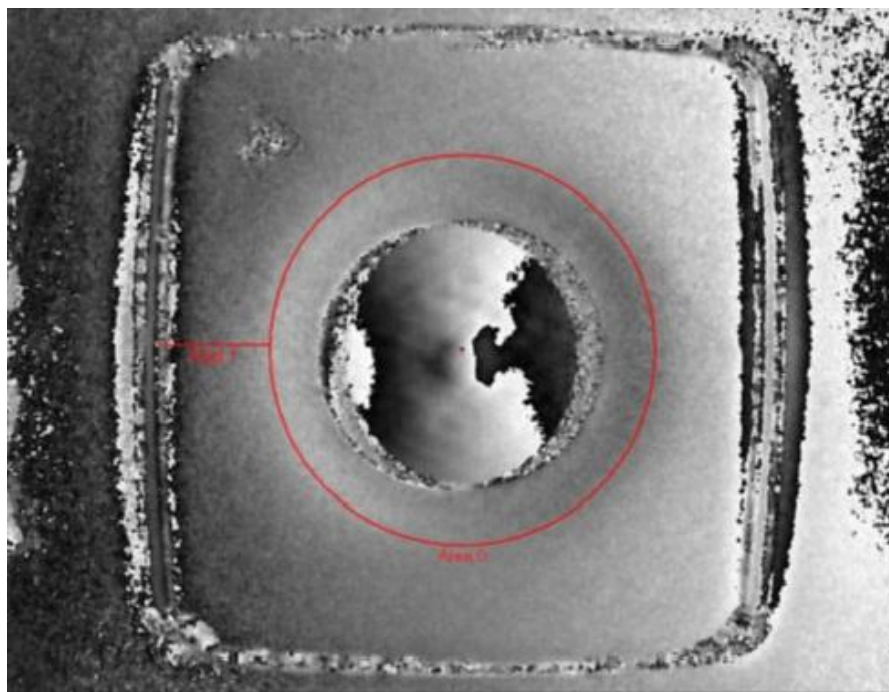


Рисунок 1.6 – Обнаруженная поврежденная зона в образце из ПКМ после механической обработки, использован метод шерографии

1.2 Анализ геометрических характеристик металло-композиционного болтового соединения конструктивно-подобного образца стыка агрегатов конструкции самолета

В ЦАГИ испытывались образцы болтовых соединений металло-композиционных конструкций- типовые макетные образцы соединений, в которых моделируется соединение агрегатов из ПКМ с использованием металлического крепежа – болтов и соединительных накладок. Конструкция соединения состоит из двух основных деталей (рисунок 1.7-1.8): захвата (из титанового сплава *BT6*), композитной панели из углепластика *Cusom 977-2* и текстолитовой прокладки между титановым захватом и композитной панелью. Детали соединяются двухрядным болтовым соединением $\varnothing 20$ мм и $\varnothing 16$ мм из стали типа 30ХГСА.

Практически изготовленные образцы соответствуют узлам соединения агрегата из ПКМ с металлической силовой конструкцией или двух агрегатов из ПКМ с помощью металлических накладок (бандажей). Отверстия изготавливались механической обработкой – сверлением.

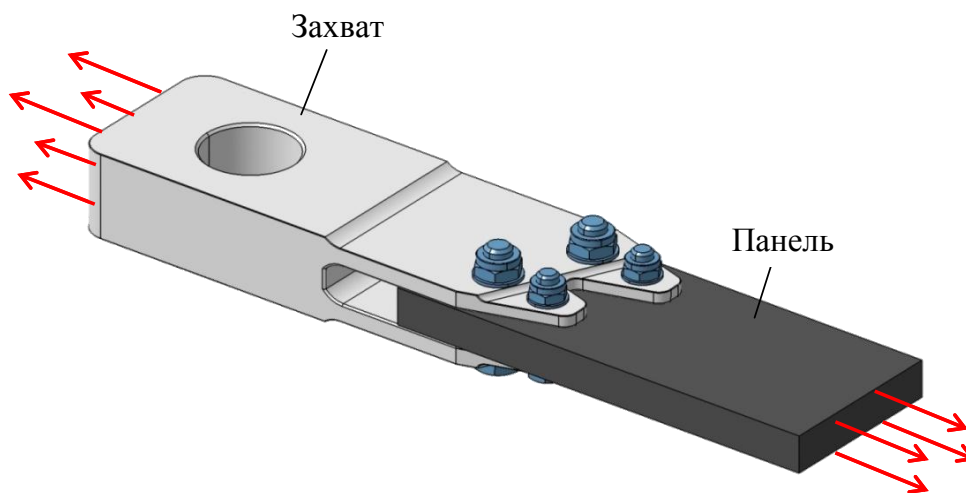


Рисунок 1.7 – Конструкция агрегатов из ПКМ



Рисунок 1.8 – Изготовленные образцы



Рисунок 1.9 – Используемая для проведения измерений координатная контрольная машина LKG-90C

Исследуемые образцы стыков были изготовлены одним из известных зарубежных изготовителей конструкций из ПКМ фирмой «FACC» (Fischer, Австрия), а также часть образцов изготовлена в России г. Воронеж.

Перед прочностными испытаниями образцов стыка были измерены зазоры в местах посадки болтов в композитной панели, характеризующие точность изготовления стыка.

Замеры показали, что зазоры в отверстиях лежат в пределах от 45 до 70 мкм. Для образца на рисунке 1.10 достигают своего минимального значения в отверстии №6, а максимального значения в отверстии №4.

Согласно данным исследований имеют место неодинаковые зазоры между болтами и отверстиями в пластине из углепластика. Следовательно, есть неравномерность нагружения болтов в пластинах из углепластика (болты с малыми зазорами, по-видимому, должны быть перегружены, а с большими зазорами - недогружены). В результате прочность узла за счет неодновременного нагружения болтов снижается. Проверка соответствия моментов затяжки болтов техническим требованиям конструкторской документации (КД) показала, что оно в узлах в основном обеспечивается.

Выполненные измерения для других образцов от других изготовителей показали, что приведенные зазоры являются системными в узлах соединений деталей из ПКМ.

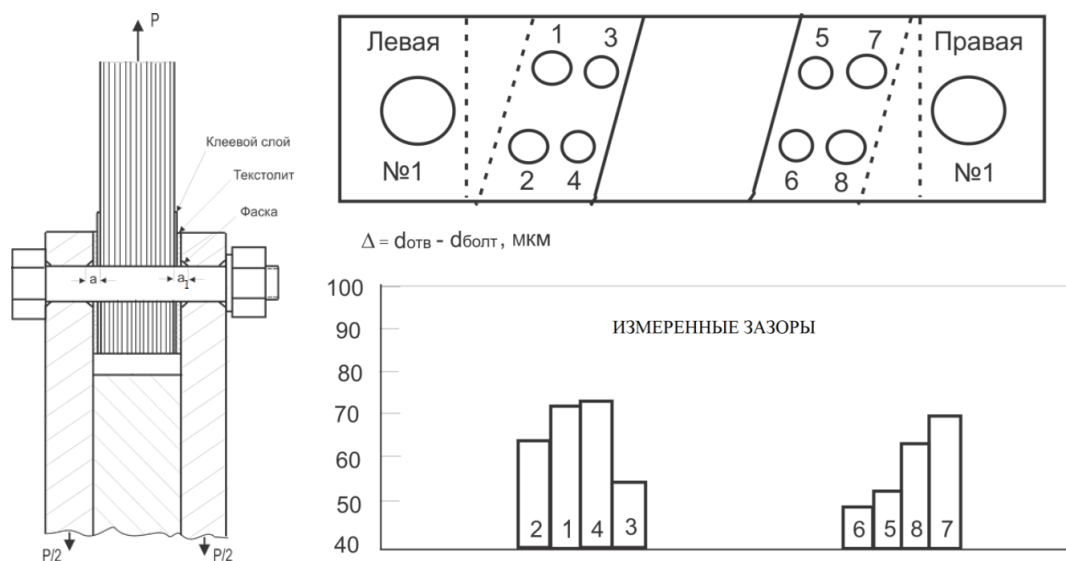


Рисунок 1.10 – Оценка зазоров в соединении

При проектировании и изготовлении авиационных конструкций для обеспечения их долговечности основной целью выбора правильного конструктивного решения формы соединения из КМ является максимальное снижение концентрации напряжений. Это обеспечивается, в том числе, плотной посадкой крепежного элемента в соединении.

Наличие зазоров в соединениях между крепежным элементом и отверстиями в соединяемых деталях приводит к существенному увеличению концентраций контактных напряжений (рисунок 1.11). Так как наличие зазора увеличивает концентрацию напряжений, то неравномерные величины зазоров в отверстиях соединения дополнительно ухудшит НДС в пластине. Расчеты НДС показывают [16], что увеличение зазора в два раза с 0,23% до 0,46% увеличивает концентрацию напряжений на 5÷10% при одинаковых условиях нагружения.

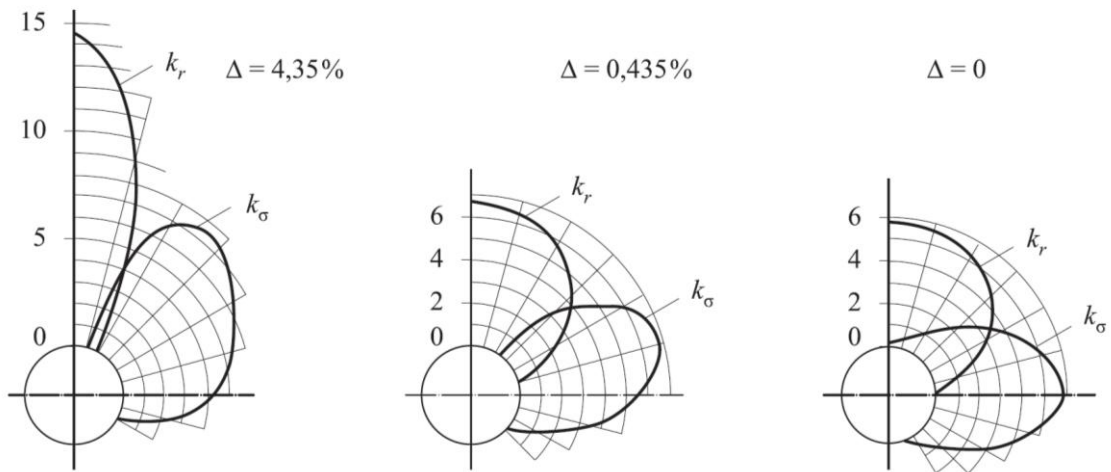


Рисунок 1.11 – Зависимость коэффициентов концентрации контактных (k_r) и растягивающих (k_σ) напряжений на контуре отверстия от величины относительного зазора Δ между отверстием и болтом в болтовом соединении

1.2 Исследования условий нагружения соединений в металло-композитных конструкциях с закладными металлическими элементами.

В настоящем разделе рассматриваются некоторые основы прочностного анализа соединений в металло-композитных конструкциях и их сопоставление для изготовленных конструктивно-подобных образцов (рис. 1.18) с полученными экспериментальными данными.

Рассмотренные выше конструктивно-подобные образцы металло-композитных соединений испытывались на прочность при растяжении и при циклическом знакопеременном усталостном нагружении.

В процессе испытаний установлено, что наиболее слабыми элементами в конструкции оказались болты крепления $\varnothing 20$ мм и $\varnothing 16$ мм (рисунок 1.7). Диаметры болтов были выбраны из условия равнопрочности узла по сопротивлению срезу. При восприятии увеличивающейся осевой нагрузки начался необратимый изгиб болтов, что является недопустимым по условиям прочности для соединения.

Поведение образцов при испытаниях исследовалось путем фотопротоколирования результатов испытаний. На рис. 1.13 приведена фотография стыковочного узла во время проведения эксперимента. В силу перераспределения циклических нагрузок на болтовые соединения по причине различных диаметров болтов, а также погрешностей изготовления и сборки элементов узла (эллиптичности отверстий, зазоров, нарушений допусков и др.) наблюдалась различная деформация болтов. В то время, как задние болты ($d=20$ мм), незначительно подверженные деформации, находились в ее линейной зоне, передние болты, миновав зону упругих деформаций, находились в нелинейной зоне – потери устойчивости и разрушающих напряжений (выделенная область).

Анализ результатов эксперимента показал, что можно выделить основные виды разрушения данной конструкции.

1. Разрушение титанового захвата в зоне передних болтов диаметром $d = 16$ мм (рисунок 1.12 а).

2. Разрушение передних болтов ($d = 16$ мм) по изгибу (показано на фотографиях рисунок 1.13).

3. Разрушение (срез) всех болтов по основанию шестигранных головок (фотоизображения на рисунке 1.12 б) - (расчетное разрушение) .

Первые разрушения объясняются резким снижением усталостной прочности, как уже отмечалось, из-за недостаточно плотных посадок в соединениях. Последние два соответствуют дальнейшему наращиванию прилагаемой циклической силы, ведущему к последующим стадиям деформации и разрушению.



а) разрушение захвата в зоне передних болтов $\text{Ø}16$ мм.



б) разрушение всех болтов по срезу шестигранных головок

Рисунок 1.12 – Типы разрушения образцов при ресурсных испытаниях

Расчетное моделирование посредством конечно-элементного метода в системе CATIA ANALYSIS рассматриваемого случая нагружения (рис. 1.16б) показал, что в пределах прилагаемых в эксперименте в области упругих деформаций усилий все

элементы конструкции данного узла находились в линейном диапазоне напряжений.

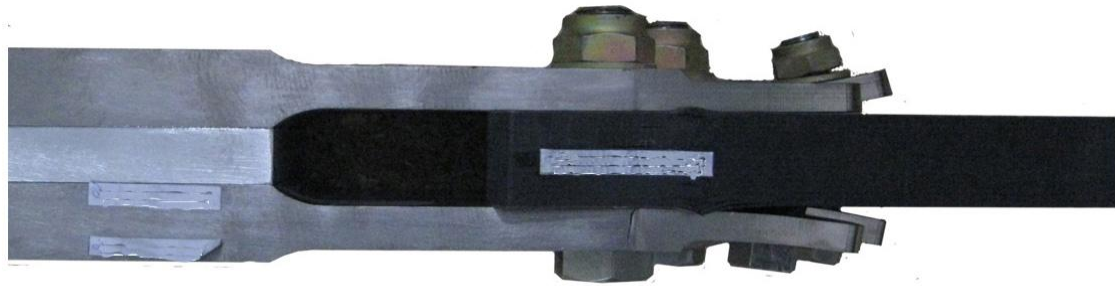


Рисунок 1.13 – Характер разрушения при испытаниях образца в результате изгиба болтов крепления

Исследование данного разрушения от реакций в соединительных болтах будет рассмотрено ниже. Из выполненного рассмотрения становится очевидно, что причиной разрушения являются специфические условия совместной деформации соединяемой композитной детали и соединительного болта, обусловленные низкой жесткостью композитного материала при нагружении давлением.

Для определения механики разрушения испытанных конструктивно-подобных образцов металло-композитных соединений проведен качественный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) для компонентов металло-композиционных соединений – отверстий в деталях из ПКМ и закладных металлических соединительных элементов.

1.2.1 Механические характеристики материалов элементов в конструкции

Физико-механические характеристики материала элементов конструкции соединения:

Болт М20 и гайка М20:

Материал 07Х16Н6-Ш

$$\sigma_B = 100 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\sigma_T = 83,3 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$E = 19500 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\nu = 0,3.$$

Захват:

Материал ВТ6

$$\sigma_B = 85-90 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\sigma_T = 80-85 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$E = 11000 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\nu = 0,3.$$

Панель:

Материал Суsom 977-2:

Таблица 1.2 – Свойства монослоя Суsom 977-2

| δ_1 | E_{11+} | E_{11-} | E_{22+} | E_{22-} | ν_{12} | G_{12} | σ_{11+} | σ_{11-} | σ_{22+} | σ_{22-} | σ_{12} | k_{BT+} | k_{BT-} |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|-----------|-----------|
| мм | ГПа | ГПа | ГПа | ГПа | | ГПа | МПа | МПа | МПа | МПа | МПа | | |
| 0,197 | 164 | 134 | 8,05 | 8,54 | 0,322 | 4,37 | 2629 | 1534 | 86,4 | 213 | 112 | 1,03 | 0,85 |

Интегральные свойства панели были рассчитаны по формулам Ю.П. Трунина для симметричных выкладок ПКМ:

$$\sigma_{11\Sigma} = K_\delta \cdot \sigma_{11};$$

$$E_{11\Sigma} = K_\delta \cdot E_{11};$$

$$K_y = \frac{n_0}{n_\Sigma} + \cos^4(\alpha) \cdot \frac{n_{45^0}}{n_\Sigma},$$

Их использование позволило упростить задачу моделирования конструкции и перейти от анизотропных к изотропным характеристикам материала. В итоге получили следующие характеристики для панели:

$$K_y = \frac{n_0}{n_\Sigma} + \cos^4(45^0) \cdot \frac{n_{45^0}}{n_\Sigma} = \frac{n_0}{n_\Sigma} + 0,25 \cdot \frac{n_{45^0}}{n_\Sigma} = \frac{60}{110} + 0,25 \cdot \frac{40}{110} = 0,636;$$

$$\sigma_{11+\Sigma} = K_y \cdot \sigma_{11+} = 0,636 \cdot 2629 = 1672 \text{ МПа} = 167,2 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\sigma_{11-\Sigma} = K_y \cdot \sigma_{11-} = 0,636 \cdot 1534 = 976 \text{ МПа} = 97,6 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$E_{11+\Sigma} = K_y \cdot E_{11+} = 0,636 \cdot 164 = 104,3 \text{ ГПа} = 10430 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$E_{11-\Sigma} = K_y \cdot E_{11-} = 0,636 \cdot 134 = 85,22 \text{ ГПа} = 8522 \text{ кгс/мм}^2.$$

Рассматриваемый образец имеет конструкцию соединения, в которой элементы агрегата из ПКМ присоединяются к силовой конструкции «ухо-вилка». Вилка изготавливается с проемом, превышающим толщину закладываемого соединительного элемента из ПКМ. Для компенсации зазора к закладываемому соединительному элементу из ПКМ приклеивается слой текстолита.

Геометрическая модель образца, подготовленная в системе САПР, и механические характеристики материалов соединяемых деталей и болтов составили исходную информацию для конечно-элементного расчета.

Силы трения в конструкции учитывались через коэффициент трения $k=0,22$ между текстолитом и титановым захватом.

1.2.2 Анализ усталостного разрушения образца при предельных прикладываемых циклических нагрузках

В результате экспериментальных исследований прочностных свойств образцов установлены основные виды разрушения данной конструкции соединения:

- Разрушение титанового захвата в зоне передних болтов диаметром $d = 16$ мм.
- Разрушение передних болтов ($d = 16$ мм) по изгибу.
- Разрушение (срез) всех болтов по основанию шестигранных головок (расчетное разрушение).

Первые типы разрушения объясняются резким снижением усталостной прочности, как уже отмечалось, из-за недостаточно плотных посадок в соединениях. Последние два вида разрушения представляют наибольший интерес. Конечно-элементное моделирование (КЭМ) одноточечного болтового соединения $\varnothing 20$ мм, методом в системе *CATIA-ANALYSIS* позволяет получить некоторые объяснения механизмам разрушения соединений.

Визуализация решения задачи для одноточечного болтового соединения $\varnothing 20$ мм представлена на рисунках 1.14-1.15).

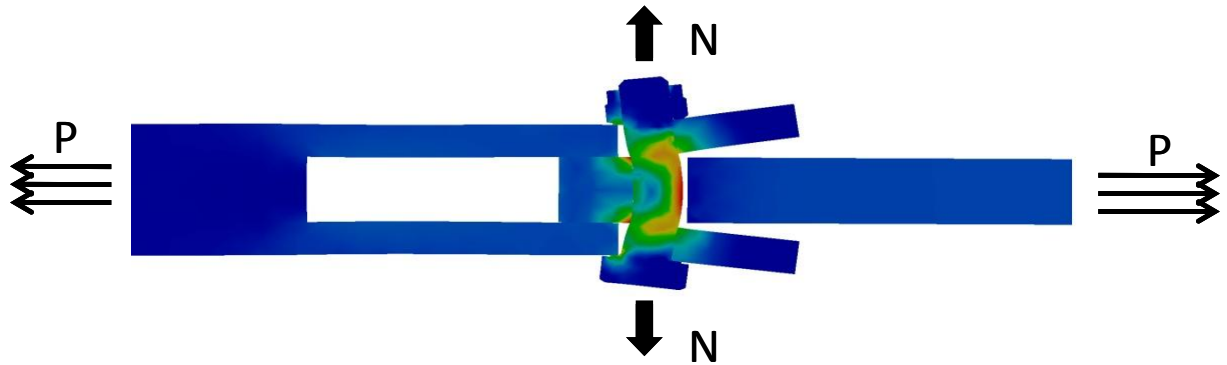


Рисунок 1.14 – Результаты расчета тестового одноточечного болтового соединения

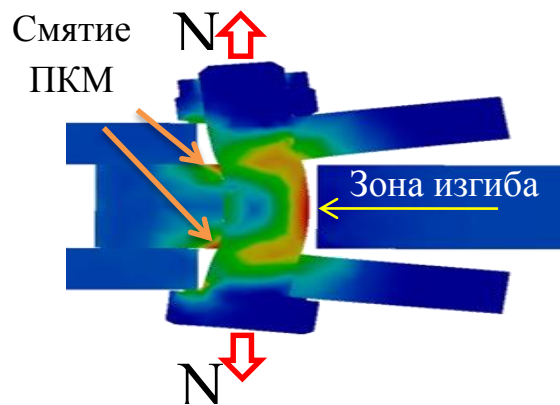
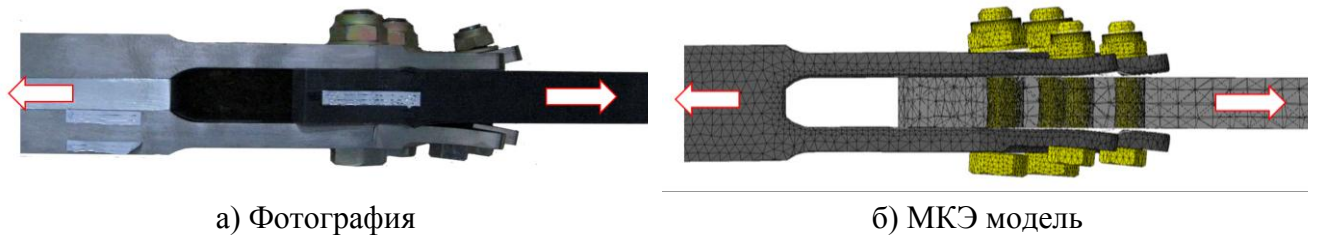


Рисунок 1.15 – Деформация композитной детали – «изгибающий» пуансон

На рисунке 1.15 видны зоны повышенного напряжения в верхних углах (слева) упирающейся в болт стороны отверстия детали из ПКМ. Углы деформируются вследствие существенно меньшей прочности связующего в ПКМ на сжатие по сравнению с металлическим материалом соединительных элементов. Упирающаяся сторона приобретает форму пуансона, изгибающего болт.

На изображении напряженного состояния болта видны две наиболее опасные зоны: середина болта и области перехода цилиндрической части болта в шестигранную головку. Зоны смятия детали из ПКМ приводят к изменению геометрической формы этой детали и воздействию ее на болт как изгибающего пуансона.

Визуальный анализ результатов эксперимента и форм напряженно-деформированного состояния в модели (рисунок 1.16) показывает удовлетворительную сходимость конечно-элементной модели с экспериментом несмотря на то, что в эксперименте конструкция нагружается циклическими нагрузками, а в модели - статическими.



а) Фотография
б) МКЭ модель
Рисунок 1.16. – Разрушение образца при изгибе болтов крепления

1.3 Экспериментальная оценка эффективности клее-механического ремонта деталей из ПКМ

При проведении ремонтно – восстановительных работ для устранения ударных повреждений в деталях из ПКМ широко применяются клее-механические соединения (болтовое или заклепочное соединение) ремонтирующей накладкой из металлического сплава или композиционного материала (рисунок 1.17).

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 жёсткости отремонтированной зоны по сравнению с исходной (рисунок 1.18). На рисунке 1.18 изображена эпюра действующих напряжений в отремонтированной зоне, полученная по результатам тензометрии в процессе нагружения сжатием реального конструктивно-подобного образца. Видно, что в зоне ремонта после установленных крепежных элементов измеренная деформация (напряжения) существенно снижаются. Данные дефекты приведут к существенному снижению ресурса в случае знакопеременного нагружения, повышению концентрации контактных напряжений и, соответственно, низкому восстановлению прочности отремонтированной детали, а также снижение

жесткости отремонтированной зоны приведет к ее преждевременной потере устойчивости.

В этой связи для обеспечения жесткого крепления ремонтирующего элемента в изделиях из ПКМ целесообразна его установка с небольшим натягом (прессовая посадка) или плотная установка крепежных элементов (болты, болт-заклепки).



а) вид снаружи



б) вид изнутри

Рисунок 1.17 – Панель с ремонтом с применением металлической накладки в зоне обшивки

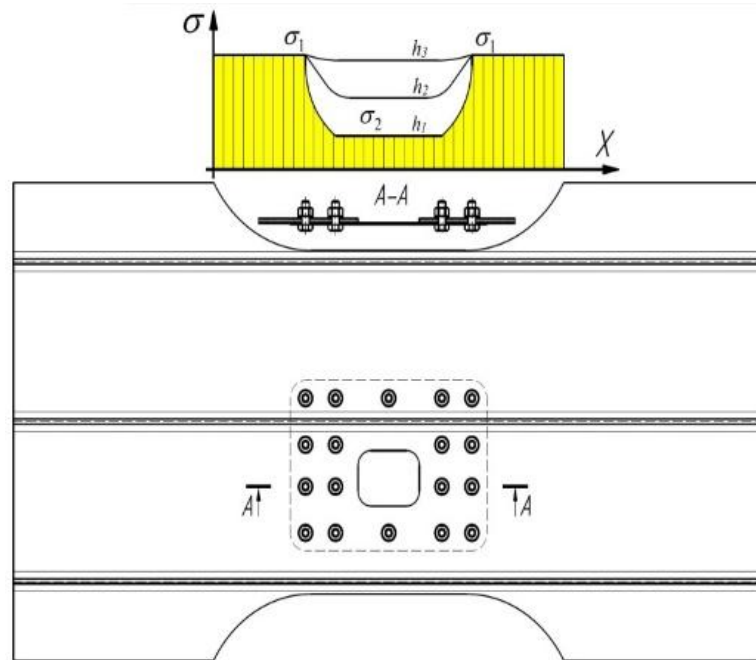


Рисунок 1.18 – Эпюра напряжений в зоне ремонта

1.4 Направления повышения прочности и ресурса деталей из ПКМ в соединениях и при восстановительном ремонте ударных повреждений

Результат расчетно-экспериментального исследования конструктивно-подобного образца выявил ряд задач, решение которых необходимо для обеспечения прочности и ресурса металло-композитных соединений. Среди них:

- образующиеся вследствие проведения механической обработки деталей из ПКМ (фрезерование, сверление) дефекты типа микротрещин, ворсистости, сколов связующего;

- распространение расслоений вглубь обработанного материала, что существенно снижает его прочность, жесткость и долговечность при циклических нагрузках в зонах обработки;

- наличие зазоров в соединениях между крепежным элементом и отверстиями в соединяемых деталях, которые приводят к существенному увеличению концентраций контактных напряжений и неравномерному включению крепежных элементов в многоточечном соединении;

- выявлены зоны смятия детали из ПКМ, которые приводят к изменению геометрической формы этой детали и воздействию ее на крепежный элемент как

изгибающего пуансона. Дополнительно стоит учитывать, что эти области в детали из ПКМ имеют пониженную прочность и жесткость после изготовления отверстия с применением механической обработки.

Предлагается снизить влияние этих особенностей композиционных материалов в конструкциях, традиционно используемых при применении металлических изотропных материалов следующими основными способами:

- во-первых, это уменьшить степень разрушения кромок за счет подбора инструмента и режимов обработки композиционного материала;

- во-вторых, на основе стандартной клеевой композиции разработать модифицированную композицию холодного отверждения с высокой прочностью при растяжении, сжатии, сдвиге, вязкостью и трещиностойкостью, наиболее существенных при использовании в соединениях;

- в-третьих, определить рациональную затяжку болта, которая позволит уменьшить изгибающие моменты, воздействующие на него со стороны детали из композиционного материала.

Определение рациональных технологических параметров механической обработки деталей из ПКМ

Данная задача состоит в исследовании влияния различных технологических параметров при обработке деталей из ПКМ на размеры повреждений кромок.

С целью уменьшения повреждения кромок необходимо отобрать специальный инструмент и исследовать влияние основных технологических параметров механической обработки (скорость резания, определяемая скоростью вращения шпинделя и диаметром инструмента, подача, температура в зоне резания) на качество обработки, а также исследовать соотношения между режущими силами и повреждениями на обработанных кромках при заданных параметрах резания – скорости резания, осевой глубины резания, ширины резания и скорости подачи, а также направления фрезерования (попутное встречное).

При выборе технологических параметров обработки необходимо оценивать следующие параметры:

- размер повреждений на обрабатываемых кромках со стороны входа инструмента и со стороны выхода;
- момент силы резания при сверлении и фрезеровании (для большего момента, при прочих равных, характерны более высокие внутренние повреждения);
- при возможности шероховатость обработанной поверхности;
- температуру в зоне обработки, т.к. превышение температуры стеклования связующего в зоне резания приведет к его охрупчиванию и, как следствие, снизит прочностные характеристики изготовленной детали.

Разработка модифицированной клеевой композиции холодного отверждения с высокими прочностными характеристиками

Заполнение клеевой композицией дефектов материала, полученных при его обработке, позволит исключить зазоры между отверстием и крепежным элементом. Таким образом уменьшается концентрация контактных и растягивающих напряжений на контуре отверстия в многоточечных соединениях, что позволит включить в работу при приложении нагрузки все крепежные элементы одновременно и, в итоге, повысить механические характеристики конструкции. При этом к применяемой клеевой композиции предъявляются повышенные требования к ее механическим характеристикам (модуль упругости, прочность, вязкость и разрушающие напряжения при сдвиге).

Определение рациональной затяжки крепежного элемента

В дополнение к определению технологических режимов обработки ПКМ и заполнению имеющихся зазоров в соединениях целесообразно спроектировать металло-композитные соединения с учетом их усталости и определить конструктивные особенности. В частности, известны работы, в которых показано, что предварительная затяжка крепежного элемента (болт, заклепка) позволяет повысить как статическую прочность соединения, так и его ресурс. В работе Хейвуд Р.Б. [61] показано, что выбор предварительной затяжки крепежных болтов в соединениях может существенно увеличить их усталостную долговечность. На рисунке 1.19 показаны приведенные Хейвудом Р.Б. результаты

экспериментальной оценки влияния затяжки болтов на усталостную долговечность соединения.

| Предварительная затяжка в кг | Среднее разрушающее число циклов |
|------------------------------|----------------------------------|
| 640 | 6 000 |
| 2670 | 36 000 |
| 3260 | 215 000 |
| 3800 | 5 000 000 |

Рисунок 1.19 – Экспериментальная оценка [61] влияния затяжки болтов на усталостную долговечность соединения

В работе В.В. Воробей и О.С. Сироткина [15] теоретически показано, что в соединениях затяжка крепежных элементов влияет на концентрацию напряжения вокруг отверстия, а также на их прочность и усталостную долговечность. На рисунке 1.20 показана, полученная в работе [15], теоретическая зависимость коэффициента концентрации напряжений вокруг отверстия в зависимости от затяжки крепежного элемента.

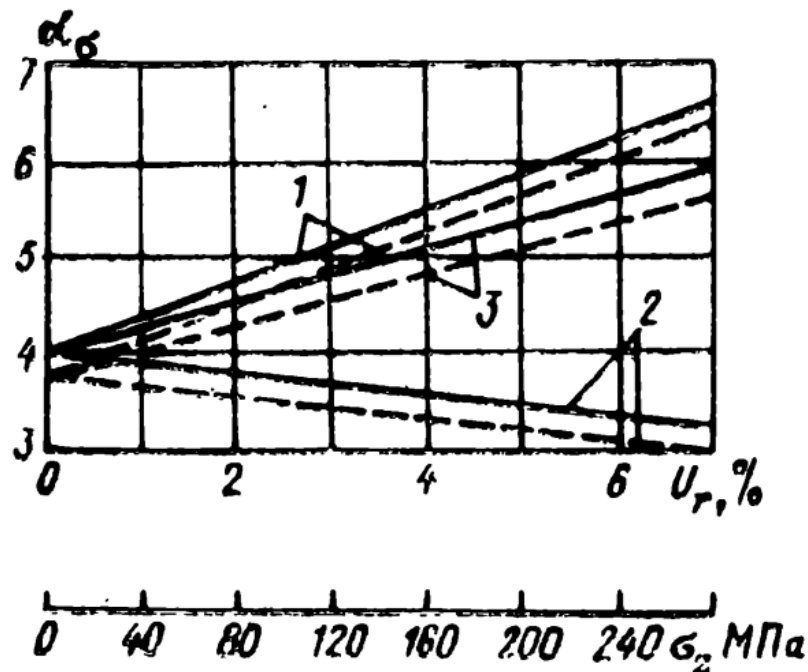


Рисунок 1.20 – Изменение теоретического коэффициента концентрации напряжений в зависимости от натяга $2U_r$ и затяжки σ_z (2- действие затяжки)

————— - углепластик; - - - - - стеклопластик

Результаты экспериментальных исследований влияния затяжки крепежных болтов на усталостную долговечность соединений, полученная в работе [15], показана на рисунке 1.21.

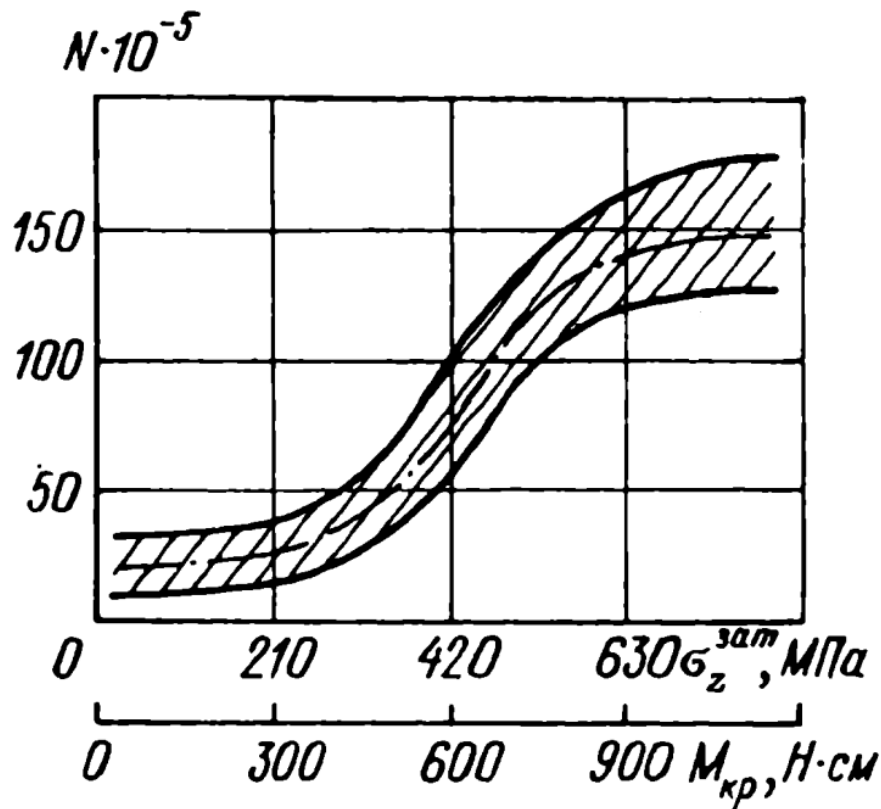


Рисунок 1.21 – Влияние затяжки крепежного элемента на усталостную долговечность соединения

Также анализ напряженно-деформированного состояния показал, что при нагружении болтового соединения вследствие существенно низкой прочности композиционного материала на смятие реализуется деформация зоны отверстия, давящей на болт, фактическое превращение его в изгибающийся болт пуансон (рисунок 1.15). В результате, вместо расчетного разрушения на срез, реализуется изгибное разрушение болтов и отрыв головок. Дополнительная затяжка болта позволит уменьшить изгибающие моменты, воздействующие на него со стороны детали из композиционного материала. Целесообразно определить затяжку крепежного элемента при разработке болтовых соединений.

Выводы к главе 1

1. Рассмотрены основные проблемы снижения прочности и ресурса соединений в металло-композитных авиационных конструкциях.
2. Показано, что они связаны прежде всего с повреждением кромок деталей из ПКМ при проведении механической обработки после формования
3. 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 при недостаточной плотности посадки.
4. Возникающее при контакте с закладными металлическими соединительными элементами смятие кромок отверстий в детали из ПКМ приводят к переходу от расчетного для соединений среза болта к его изгибу и потере прочности при меньших величинах нагрузок, а также снижению долговечности при знакопеременном нагружении.
5. Схожие проблемы возникают при проведении восстановительного ремонта ударных повреждений с применением металлических накладок на поврежденные зоны, соединяемых с деталью металлическим крепежом (болты, заклепки).
6. Установлено, недостаточная жесткость крепления усиливающих накладок в зоне ремонта, что свидетельствует о неравномерном включении крепежных элементов вследствие наличия неравномерных зазоров. Передача силовых потоков происходит за счет догружения неповрежденных зон детали по обе стороны от повреждения.
7. Сформулированы направления повышения прочности и ресурса деталей из ПКМ в соединениях и при восстановительном ремонте ударных повреждений.

Глава 2. Разработка нано-модифицированной клеевой композиции с повышенными прочностными характеристиками для упрочнения кромок деталей из ПКМ и повышения ресурса соединений

Решение задачи повышения прочности и ресурса соединений в деталях из ПКМ возможно за счет использования клеевой композиции холодного отверждения, которую можно применять, в том числе, и на этапе сборки агрегатов летательного аппарата. На сегодняшний момент при сборке авиационных деталей применяются двухкомпонентные герметики, обладающие вязкостью, схожей с эпоксидной смолой. В связи с этим целесообразно разработать клеевую композицию на основе эпоксидной смолы с высокими механическими свойствами, в частности, такими как прочность при растяжении, сжатии, сдвиге, вязкостью и трещиностойкостью, наиболее существенными при использовании в соединениях.

Повышение эффективности клеевых композиций возможно также за счёт применения наноматериалов различной природы и структуры в качестве малых добавок в стандартные смеси, в том числе для модификации клеевых композиций могут применяться наноматериалы на основе углерода. Это позволит повысить такие механические характеристики широко используемых в производстве конструктивных клеев, как твердость, модуль упругости и сдвиговые напряжения.

Эти характеристики можно получить добавлением в существующий конструкционный клей армирующих элементов в виде макро-углеродных волокон и углеродных нано-компонент. На сегодняшний момент для введения в полимерную матрицу можно использовать ряд углеродных нано-модифицирующих добавок. Наиболее распространенные из них, синтезируемые в больших объемах, являются аморфный углерод, углеродные нано-волокна, графен.

Широкий выбор углеродных нано-частиц ставит задачу рационального выбора типа модифицирующего элемента, его эффективности при взаимодействии с полимерной матрицей, а также способа их диспергирования и массовую концентрацию в базовой эпоксидной клеевой композиции.

Решению данных задач посвящена настоящая глава.

2.1 Физические основы повышения прочности и трещиностойкости полимерной матрицы в результате диспергирования в ней углеродных nano-компонент

Основная проблема, возникающая при попытке повышения механических характеристик полимеров в результате добавления УНТ, связана с необходимостью обеспечения передачи усилия от полимерной матрицы к внедренным в нее нанотрубкам. В случае, если взаимодействие поверхности УНТ с молекулами полимера имеет Ван-дер-Ваальсову природу, нанотрубка при наложении на материал механической нагрузки практически свободно перемещается по объему полимера, или, как говорят, ведет себя подобно "волосу в пироге". В этом случае добавление нанотрубок в полимерный материал слабо влияет на механические свойства последнего и может даже привести к их ухудшению. Реальное улучшение механических параметров полимерного материала в результате введения в него УНТ может быть достигнуто в случае, если поверхность нанотрубки связана с молекулами полимера химическим взаимодействием, характерная энергия которого в десятки раз превышает соответствующее значение энергии ван-дер-ваальсова взаимодействия. Тем самым проблема повышения прочностных свойств композиционных материалов путем добавления УНТ сводится к проблеме сопряжения поверхности УНТ с молекулами полимера с целью обеспечения максимально эффективного химического взаимодействия между ними.

Повышение механических свойств полимерной матрицы происходит в первую очередь за счет структуризации полимера с образованием зон уплотнения вокруг добавленных nano-частиц и их агломератов. Границы этих зон уплотнения являются стопперами трещин. На рисунках 2.1 представлено изображение полимерной матрицы с диспергированными в ней углеродными nano-частицами. Видна структура, зоны уплотнения вокруг агломератов nano-частиц и границы этих зон уплотнений. Полученное изображение подтверждает проведенную С.А. Лурье

аналитическую оценку влияния nano-частиц на полимерную матрицу. На рисунке 2.2 показана теоретически полученная структуризация полимерного связующего за счет добавления в него углеродных nano-частиц.

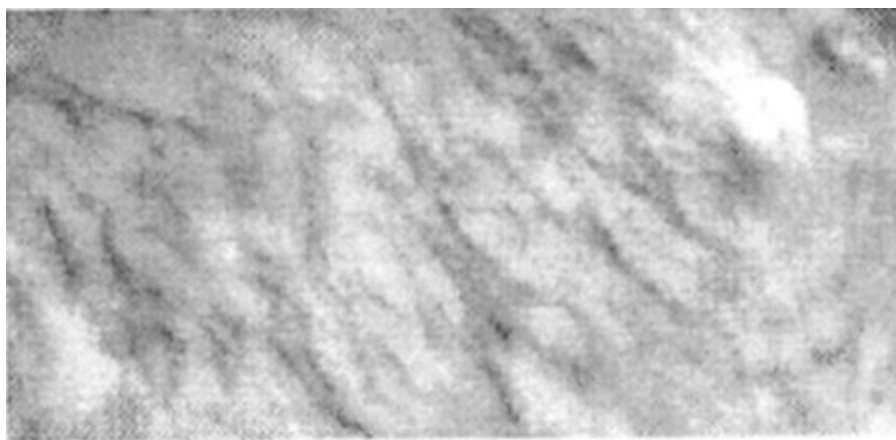


Рисунок 2.1 – Изображение модифицированной углеродными nano-частицами полимерной матрицы, изображения получены с применением туннельного электронного микроскопа (Polymer-Clay Nanocomposites: TEM of Exfoliated Polystyrene CASE WESTERN UNIVERSITY, USA)

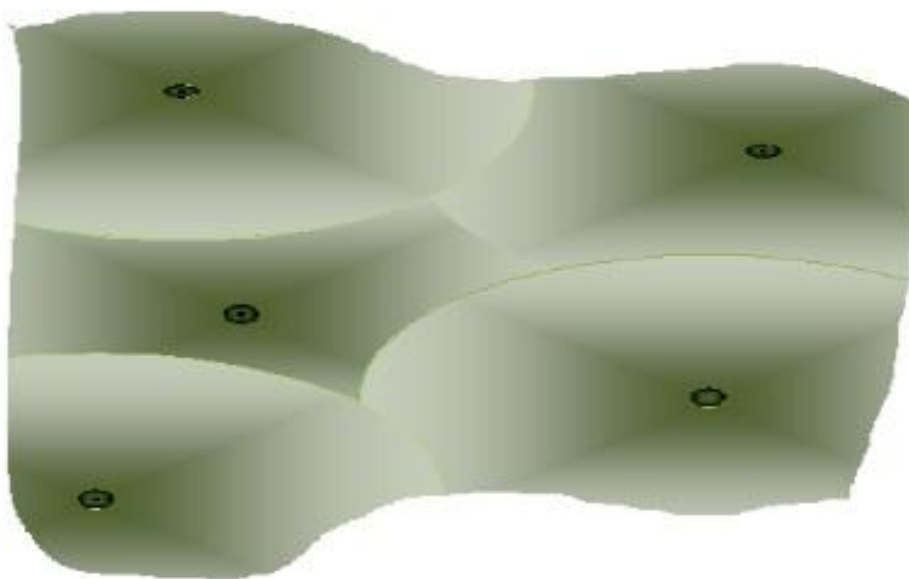


Рисунок 2.2 – Результат проведенной аналитической оценки добавления углеродных nano-частиц в полимерную матрицу (Лурье С.А., ИПРИМ РАН)

Углеродные нанотрубки имеют отличные механические свойства, а именно высокое значение модуля Юнга, высокая прочность на растяжение, низкая плотность и т.д. [62, 63-64]. Эти свойства делают углеродные нанотрубки идеальными для армирования их в матрице полимера. Множество работ посвящено

попыткам изучения и улучшения механических свойств полимерных нанокомпозитов с углеродными нанотрубками. Так, в работе [65] были получены нанокомпозиты, состоящие из полистирола с многослойными углеродными нанотрубками, ультразвуковым методом при помощи растворения и испарения растворителя. При добавлении 1 мас.% многослойных углеродных нанотрубок в полистирол модуль упругости и прочность при повышенных нагрузках увеличились на 36 - 42% и ~25%, соответственно. Углеродные нанотрубки эффективно выдержали испытания на прочность при растяжении. Исследования на туннельном электронном микроскопе показали, что образование трещин наблюдалось в области с низкой плотностью углеродных нанотрубок. Далее трещины распространялись вдоль слабых взаимодействий углеродных нанотрубок с полистиролом или в областях с относительно низкой плотностью углеродных нанотрубок. Если размер трещины превышал 800 нм, то углеродные нанотрубки начинали разрушаться и/или высвобождаться из матрицы [65]. В статье [66] наблюдалось постепенное увеличение жесткости до 3,5 раз при добавлении 2 мас.% однослойных углеродных нанотрубок в эпоксидную матрицу. Похожие результаты встречались в работах других исследователей [67-69, 57]. Отмечено значительное уменьшение коэффициента трения и увеличение износостойкости в композитах гидроксиапатита с углеродными нанотрубками [52].

В ряде исследований показано снижение механических свойств при добавлении углеродных нанотрубок с концентрацией выше критической и, в некоторых случаях, ухудшение механических свойств ниже результатов, полученных для исходной матрицы [70, 71-72]. Влияние разных концентраций углеродных нанотрубок в матрице исследовалось в нанокомпозитах на основе поликарбоната с многослойными углеродными нанотрубками, полученных в промышленных масштабах при помощи экструдера [52]. Замечено, что композит, содержащий 1 мас.% углеродных нанотрубок, показал улучшенные результаты прочности при растяжении на 4,5% по сравнению с исходным поликарбонатом. При увеличении концентрации многослойных углеродных нанотрубок в полимерной матрице происходило значительное уменьшение прочности при

растяжении или прочности на разрыв. Кроме этого, наблюдалось увеличение вязкости образца с ростом концентрации углеродных нанотрубок. Это приводило к образованию неоднородной структуры полимерного композита и снижению его механических свойств.

Таким образом, диспергирование углеродных нанотрубок играет важную роль в получении полимерных нанокомпозитов с углеродными нанотрубками. Существуют различные методы получения полимерных нанокомпозитов, армированных углеродными наполнителями. Равномерное диспергирование и соответствие углеродных нанотрубок с матрицей полимера позволяют предотвратить агломерацию, обеспечить лучшее распределение углеродных нанотрубок в матрице и улучшить механические свойства материала. Так, в статье [73] описано, что при добавлении 1 мас.% химически функционализированных многослойных углеродных нанотрубок в полимерную матрицу методом *in situ* полимеризации, механические свойства значительно увеличились на 11 – 35% по сравнению с исходными композитами. Скорее всего, сильное взаимодействие между углеродными нанотрубками и полимерной матрицей в процессе полимеризации привели к улучшению передачи механической нагрузки через химические связи [73]. Авторы работы [74] получили полимерные нанокомпозиты с углеродными нанотрубками методом свободнорадикальной полимеризации. Замечено, что при добавлении 7 мас.% однослойных углеродных нанотрубок в полимерную матрицу модуль Юнга увеличился в 120 раз. Кроме диспергирования, на свойства композитов также оказывают влияние соотношение, длина углеродных нанотрубок и распределение углеродных нанотрубок в матрице [75-76].

2.2 Нано-модифицированная клеевая композиция с повышенными характеристиками трещиностойкости (вязкости) для применения при упрочнении кромок деталей и отверстий после механической обработки, а также в узлах соединений металло-композитных авиационных конструкций и при их ремонте с применением усиливающей металлической накладки

В данном разделе представлены расчетно-экспериментальные исследования по выбору типа нано-модифицирующих добавок, их способа диспергирования, массовой концентрации.

В качестве базовой клеевой композиции принят широко применяемый в авиационной промышленности эпоксидный клей ВК-27, основным компонентом которого является эпоксидная смола ЭД-20. В его состав, вместо армирующего компонента – асбеста, возможно введение углеродного нано-модификтора.

Для оценки повышения модуля деформации клеевой композиции, характеризующего её вязкость, проведен расчет по методу асимптотического усреднения Н.С. Бахвалова [79], 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. 2.3).

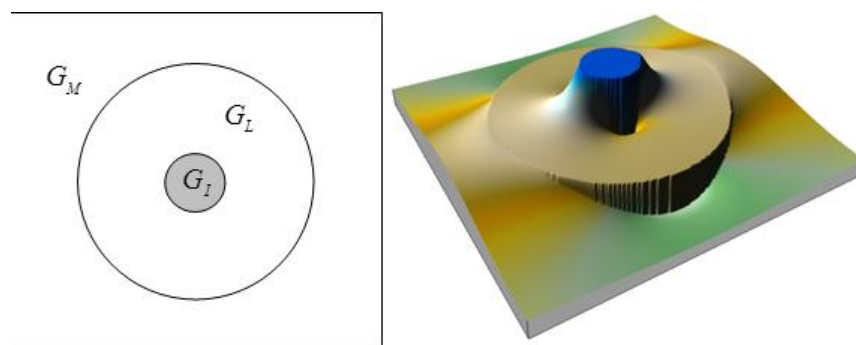


Рисунок 2.3 – Выделенная ячейка в массиве клеевой композиции.

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 , \mathbf{p}_s – вектор касательных сил на поверхности грани, $A_{ij}(\xi)$ – матрицы, характеризующие жесткостные параметры включений, матрицы и слоя, $A_{ij} = \{\mu(\delta_{ij}\delta_{kl} + \delta_{jk}\delta_{li}) + \lambda\delta_{ik}\delta_{jl}\}$, $[\mathbf{u}]$ – перемещение.

При сформулированных условиях в задаче на ячейке средние деформации соответствуют одноосному деформированному состоянию: $\langle \varepsilon_{11} \rangle = L_1$, $\langle \varepsilon_{ij} \rangle = 0$, $i, j \neq 1$. На этом основании эффективная жесткость рассчитывается как средние напряжения в ячейке, нормированные на среднюю деформацию растяжения:

$$C_{11} = \langle \sigma_{11} \rangle / \langle \varepsilon_{11} \rangle, \quad C_{12} = \langle \sigma_{22} \rangle / \langle \varepsilon_{11} \rangle.$$

Эффективный модуль Юнга E_H отсюда рассчитывается по следующей формуле:

$$E_H = \frac{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}{C_{11} + C_{12}}$$

Для эффективного решения задачи на ячейке применялся блочный аналитико-численный метод, дающий решение с высокой точностью Д.В. Волкова-Богородского [80].

Расчёт выполнялся для двух углеродных нано-компонент – металл/углеродных частиц (МУЧ) (в экспериментах нами использовались МУЧ в виде мелкодисперсного порошка из смеси частиц меди, распределенных в углеродной матрице, идентичные по размерам и форме аморфному углероду) и углеродных нано-трубок.

Для них было проведено экспресс диспергирование и выполнена оценка модуля деформации методом нано-индентирования. Результаты представлены в таблице 2.1.

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

Таблица 2.1 – 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 |

Для более широкого сравнительного рассмотрения рациональных типов НМК в настоящей работе использован компьютерный метод подбора перспективных и модифицированных наполнителей, который позволили сузить возможные варианты выбора и модификации наполнителей для получения новых видов эпоксидных клеев с улучшенными эксплуатационными свойствами. При этом энергетические и механические свойства межфазных слоев, образованные эпоксидной матрицей частицами наполнителя рассматриваются с помощью кластерного метода и подхода микроскопической координаты трения, в рамках оригинального пакета квантово-механических программ NDDO/sp-spд [Оригинальный пакет квантово-механических программ NDDO/sp-spд, ИПРИМ РАН, Свидетельство о государственной регистрации № 2009614949 от 10.09.2009), реализованный в параллельном режиме расчета]. Данная работа проводилась совместно со специалистами ИПРИМ РАН по заказу ФГУП «ЦАГИ» в рамках программы совместных исследований для авиационно – космических технологий ФГУП «ЦАГИ» и институтов РАН. Результаты работы представлены в [60].

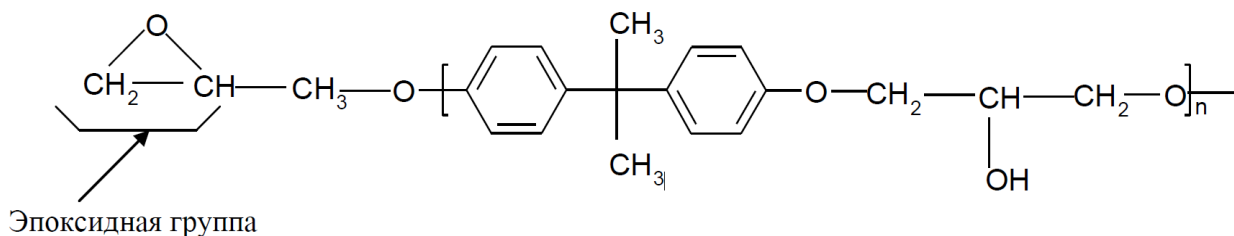
2.2.1. Эпоксидные смолы и клеи на их основе

Для того, чтобы понять особенности взаимодействия эпоксидной матрицы с частицами наполнителя, кратко остановимся на описании эпоксидных смол и клеев.

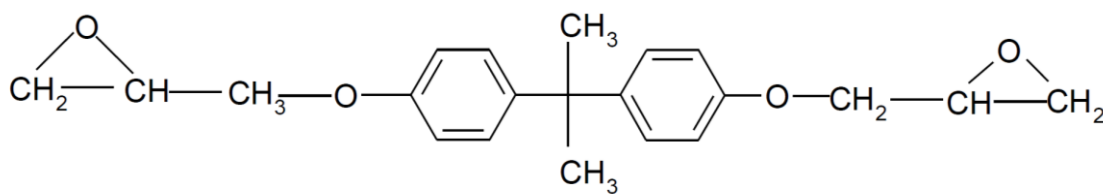
Эпоксидные смолы являются олигомерами, содержащими эпоксидные группы, они способны под действием отвердителей образовывать сшитые полимеры. Получаются они при поликонденсации эпихлоргидрина с фенолами, чаще всего – с бисфенолом А.. Свойства этих смол определяются их химической

структурой. Единственной связью, кроме -C-C-, в линейном полимере является простая эфирная связь, причем ее химическая стойкость значительно выше сложноэфирной связи.

Эпоксидные смолы имеют общую формулу:



Чаще всего встречаются эпоксидные смолы с количеством эпоксидных групп меньше 10. Например, ЭД-20 имеет только 2 эпоксидные группы и выглядит следующим образом:



Чем больше степень полимеризации, тем гуще смола. Например, если n приблизительно равно 25, то смола при комнатной температуре является твердым пластиком. Для смол с меньшим содержанием n для ее отверждения нужно в ее состав вводить отвердители, при этом смола становится пластичной и твердой. Реакционные гидроксильные и эпоксидные группы располагаются вдоль цепи на достаточном расстоянии, так что отвердители, которые «сшивают» линейные макромолекулы смолы и делают ее термореактивной, достаточно удалены друг от друга, чтобы обеспечить гибкость отвержденной смолы. Полярная природа макромолекул обеспечивает хорошую адгезию клеев на основе эпоксидных смол. Фенольная гидроксильная группа, которая часто вызывает слабую окраску полимеров, этерифицирована, поэтому смолы бесцветны и при хранении не окрашиваются.

Отверждение эпоксидных смол обычно осуществляется аминами и полиамидами, содержащими первичные и (или) вторичные аминогруппы. Так как

отвердители обычно являются четырех или пятифункциональными соединениями, то получается трехмерная сшитая структура, которая обладает большой жесткостью и химической стойкостью. В то же время благодаря длине и природе макромолекул эпоксидной смолы отвержденная пленка имеет большую гибкость и адгезию. Процесс отверждения не зависит от наличия кислорода и протекает с достаточной скоростью при комнатной температуре, ускоряясь при нагревании.

Применение растворителей, пластификаторов, наполнителей позволяет регулировать физико-химические свойства эпоксидных клеев. Так различные наполнители, которые вводят в клеевые композиции на основе эпоксидных смол, снижают усадку и коэффициент теплового расширения при отверждении, значительно повышают теплостойкость; кроме того, клеи с наполнителями дешевле. При этом происходит физическая модификация эпоксидных смол, которая достигается добавлением в смолу веществ, не вступающих в химическую связь с полимерной матрицей. Так небольшие количества наполнителя - окиси алюминия и железа, а также аморфной двуокиси кремния увеличивают прочность на сдвиг при растяжении отвержденной смолы при комнатной температуре. Другие наполнители, например окись титана, никеля и свинца, повышает прочность на сдвиг при растяжении при повышенных температурах, добавление каучука позволяет увеличить ударную вязкость отвержденной смолы.

Наполнители и пластификаторы различных типов содержатся, фактически, во всех эпоксидных клеевых композициях.

Основной задачей при создании материалов с комплексом эксплуатационных свойств является выбор отверждающих систем, модификаторов и наполнителей, обеспечивающих хорошие технологические свойства и заданные характеристики отвержденных материалов.

2.2.2 Методы моделирования

Структурные, энергетические и прочностные характеристики межфазных слоев наполненных эпоксидных клеев исследовались в вычислительном эксперименте в рамках полуэмпирического метода NDDO (Neglect of Diatomic Differential Overlap, пренебрежение двухатомным дифференциальным перекрыванием) [Dewar M.J.S., Thiel W., J. Am. Chem. Soc. 99 (1977) 4899] с параметризацией PM3 [Stewart J.J.P., J. Comp. Chem. 10 (1989) 209 - 221]. Используемый полуэмпирический метод наиболее близок концептуально к методам *ab initio* и немногим уступает им в точности расчетов (геометрические и энергетические характеристики), будучи параметризованным по большому количеству экспериментальных данных [Dewar M.J.S., Zoebisch E.G., Healey E.F., Stewart J.J.P., J. Am. Chem. Soc. 107 (1985) 3902].

Расчеты проведены в рамках оригинального пакета NDDO/sp-spd, в рамках которого реализовано приближение механохимической координаты трения, и который не уступает неэмпирическим расчетам по точности при рассмотрении межмолекулярных взаимодействий, однако значительно выигрывает в скорости счета.

В методах NDDO условие пренебрежения двухатомным дифференциальным перекрыванием распространяется только на пары орбиталей, локализованные на различных центрах. В результате приближение NDDO сохраняет не только одноцентровые, но и двухцентровые обменные интегралы. В настоящее время методы NDDO являются, по-видимому, самыми эффективными и вполне приемлемыми по трудоемкости средствами квантово-химических расчетов многоатомных систем.

Применение полуэмпирических методов позволяет рассчитывать на хорошую точность воспроизведения основных структурных и энергетических характеристик многоатомных систем. По нашему мнению, методы NDDO, хотя и являются наиболее трудоемкими в своем классе, наилучшим образом подходят для использования в механохимическом вычислительном эксперименте. Они

выигрывают по временам счета, возможным размерам рассматриваемых молекулярных систем, а также позволяют исследовать последовательность большого числа деформационных состояний молекулярных систем за разумное время расчета.

Вычислительный эксперимент был реализован в кластерном приближении, в котором элементы границы раздела фаз моделируются кластерами достаточно большой величины (до нескольких десятков нанометров и до нескольких десятков и сотен атомов) различного химического состава и пространственного строения. При этом строятся молекулярные модели отдельных компонентов адсорбционного комплекса и оптимизируются в квантово-химическом расчете. Затем на основе полученных моделей компонентов строится сложный кластер, моделирующий адсорбционный комплекс и также рассчитывается в квантово-химическом приближении.

Кластерные методы очень близки к методам, применяемым в квантовой химии молекулярных систем. Важное отличие обусловлено тем, что при кластерном моделировании объемного твердого тела необходимо, вообще говоря, учитывать влияние окружения кластера на его состояние. На практике это осуществляется, например, при помощи специально подобранных внешних потенциалов или граничных условий, накладываемых на решение уравнения Шредингера. Кластерные методы оказываются весьма эффективным средством моделирования локализованных объектов, каким является место локального контакта двух фаз, в нашем конкретном случае – место контакта наполнителя и полимерной эпоксидной цепи и физические размеры которых меньше, чем размеры доступных с вычислительной точки зрения кластеров.

Для моделирования перестройки структуры кластера при сдвиге одной частицы относительно другой в адсорбционном комплексе и для анализа микроскопических энергетических и механических характеристик трения в межфазном слое вычислительный эксперимент был построен по аналогии с механическими испытаниями в режиме трения. Однако в подобных экспериментах к одному контактирующему образцу прикладывается сдвигающая нагрузка, а затем

анализируется изменение взаимного расположения двух образцов. В компьютерном эксперименте в связи со спецификой моделирования изначально пошагово задаются сдвиги одной молекулярной системы относительно другой, а сила трения рассчитывается.

Взаимосвязь структуры и энергетических характеристик поверхности раздела фаз с характеристиками его напряженного состояния исследовали в рамках подхода микроскопической координаты трения (МКТ) [81-84].

Далее приведем описание схемы вычислительного эксперимента. Вначале осуществляется построение микроскопической модели молекулярной системы и ее квантово-химическая минимизация. Затем выбирается микроскопическая координата трения (МКТ), изменение которой позволяет описать требуемую последовательность деформационных состояний в межфазной зоне.

Микроскопическая координата трения задается двумя группами атомов в системе из двух частиц, определяющими направление и плоскости приложения силы трения. Положение одной частицы фиксируется путем исключения некоторых ее атомов из процесса оптимизации. Вычислительный эксперимент состоит в последовательном пошаговом перемещении второй частицы из исходного состояния вдоль МКТ. Полная оптимизация пространственного строения молекулярной системы проводится на каждом шаге. Определяющие МКТ атомы исключены из процесса оптимизации. Сила трения F_i , полученная для i -й МКТ, определяется как градиент полной энергии системы по этой координате.

В кластерных расчетах чаще применяется более простой с вычислительной точки зрения вариант метода ССП – ограниченный метод Хартри-Фока (RHF). В отличие от неограниченного метода Хартри-Фока, в ограниченном методе на набор одноэлектронных функций накладывается весьма жесткие дополнительные условия. Простейшая формулировка метода HF предложена для систем с замкнутыми оболочками, содержащими четное число электронов.

Дополнительные условия состоят в следующем: предполагается, что электроны с противоположно направленными спинами попарно занимают орбитали, пространственные части которых одинаковы и преобразуются по одному

из неприводимых представлений пространственной группы, отвечающей заданному расположению ядер. Однако нет никаких оснований утверждать, что основное состояние системы с четным числом электронов реализуется волновой функцией, отвечающей замкнутым оболочкам. Кластеры же с нечетным числом электронов являются системами с открытыми оболочками по необходимости, так как содержат хотя бы один не спаренный электрон. При строгом рассмотрении деформации трения в межфазной зоне молекулярных систем необходимо проводить в рамках приближения открытых оболочек неограниченного метода Хартри-Фока.

2.2.3 Модельные системы

В рамках описанного выше вычислительного подхода были исследованы структура, энергетические и механические характеристики межфазных слоев эпоксидных клеев с различными наполнителями. В качестве наполнителей были рассмотрены как традиционные наполнители, а именно частицы алюминия, окиси алюминия, силиката, аморфного углерода, так и менее известные как наполнители вещества, а именно шунгит, графен, углеродные нанотрубки, фуллерены, окись графена. Кроме того, на базе квантово-механических исследований была рассмотрена возможность модифицировании поверхности исследуемых наполнителей для улучшения механических свойств эпоксидных клеев. Рассчитанные данные, по которым оценивалась эффективность как немодифицированных, так и модифицированных наполнителей, были следующие - минимальное расстояние R между фрагментом цепи эпоксидного полимера и частицей наполнителя, энергия связывания $E_{\text{связ}}$, рассчитанная на одну мономерную единицу эпоксидного клея:

$$E_{\text{связ}} = E_{\text{комплекса}} - \sum E_{\text{компонентов комплекса в свободном состоянии}},$$

а также максимальная сила микроскопического трения $F_{\text{сдв.}}_{\text{MAX}}$, рассчитанная на сдвиг в 1Å полимера вдоль поверхности наполнителя.

В качестве модели фрагмента эпоксидной цепи была выбрана молекула, которая имеет две эпоксидные группы (ЭД-20). Этот олигомер имеет 49 атомов, расстояние между концевыми атомами углерода составляет 18 А. Полностью оптимизированная в КМ расчете структура этой молекулы представлена на рис.2.4.

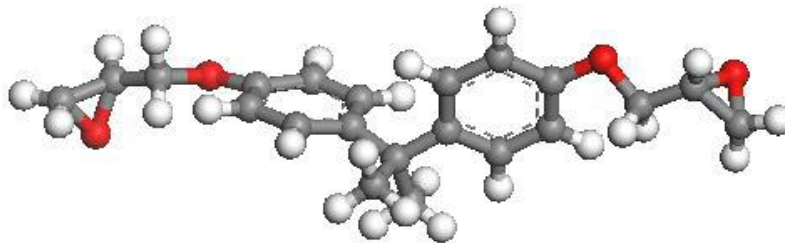


Рисунок 2.4 – Оптимизированная структура модели фрагмента эпоксидной цепи.

Используемая в расчетах модельная частица аморфного углерода CN170 содержала 170 атомов углерода. Эта частица имела ~ 15 А в диаметре, атомы углерода в ней находились как в sp^3 -, так и в sp^2 -гибридизациях, а ее поверхность была частично покрыта водородом. Фуллерен был представлен частицей C240, содержащей 240 атомов углерода, диаметр этой частицы составлял ~ 15 А. Частица углеродной нанотрубки C288 содержала 288 атомов, (9,9), имела один конец закрытый, а другой открытый по типу “кресло”. Она имела длину ~ 20 А и диаметр ~ 15 А. Поверхность последних двух частиц не содержала каких-либо поверхностных групп и имела ароматичную природу с углеродом в sp^3 -гибридизации. Оптимизированные квантово-механические структуры этих модельных кластеров представлены на рис. 2.5-2.8.

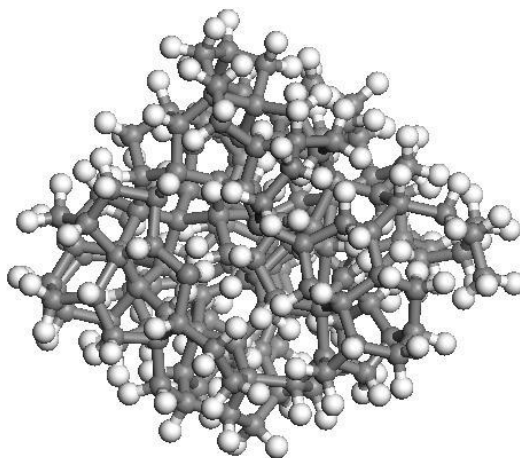


Рисунок 2.5 – Оптимизированная структура модельного кластера аморфного углерода CN170. 16

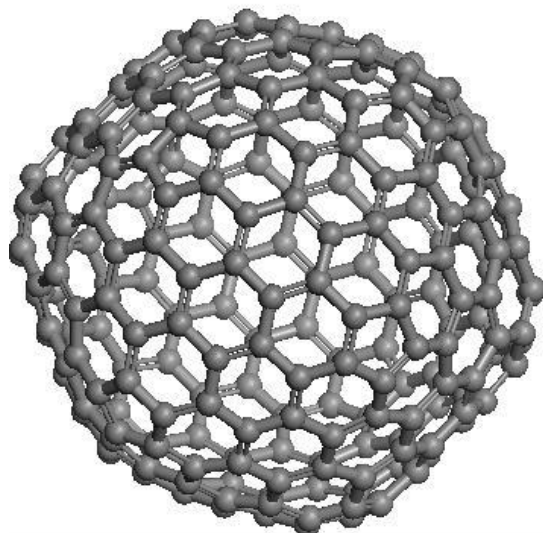


Рисунок 2.7 – Оптимизированная структура частицы фуллерена C₂₄₀. 17

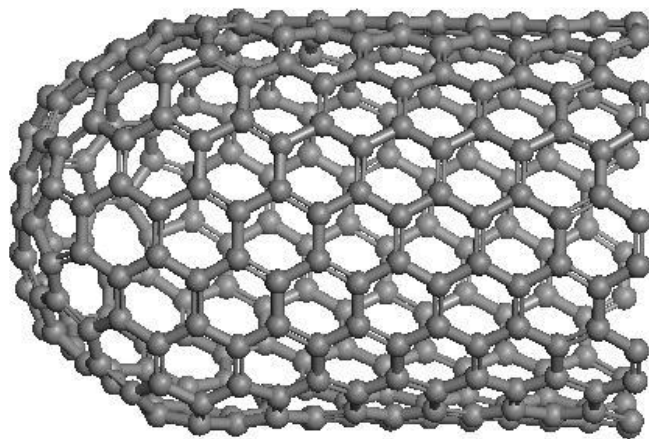


Рисунок 2.8 – Оптимизированная структура частицы углеродной нанотрубки C₂₈₈ (9,9).

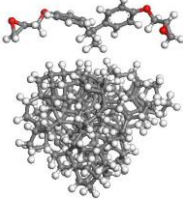
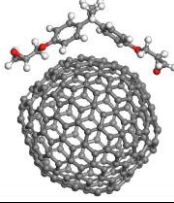
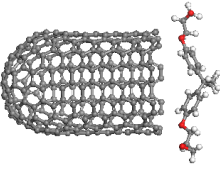
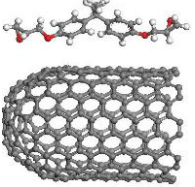
2.2.4 Квантово-механическое исследование механизмов взаимодействия компонентов эпоксидных клеев, наполненных немодифицированными наполнителями

На основе оптимизированных структур молекулы олигомера ЭД-20, моделирующей фрагмент эпоксидной цепи, и кластеров, моделирующих частицы наполнителей, были построены и оптимизированы геометрии соответствующих адсорбционных комплексов. Их структуры представлены в таблице 2.1 в столбце «Оптимизированная структура адсорбционных комплексов молекулы олигомера ЭД-20, моделирующего фрагмент эпоксидной цепи, и кластеров, моделирующих частицы наполнителей».

В настоящей работе приводится случай адсорбции ЭД-20 по длинной стороне, а также по открытому концу углеродной трубки. При этом вид адсорбции ЭД-20 по длинной стороне удобен для сравнения с наполнителями фуллереном и графеном, которые имеют такую же шестигранную ароматическую углеродную структуру.

Для каждого рассмотренного адсорбционного комплекса рассчитывалась энергия связывания $E_{\text{связ}}$, рассчитанная на одну мономерную единицу эпоксидного клея, и максимальная сила сдвигового трения $F_{\text{сдв.}_\text{MAX}}$ как градиент полной энергии системы по выбранной координате трения. Результаты расчетов представлены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 – 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, Å | E _{связ.} , ккал/моль | F _{сдв.} _МАХ, ккал/моль·Å |
|---|--|------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 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 |

Из результатов расчетов можно сделать следующие выводы.

В компьютерном эксперименте были рассмотрены четыре потенциальных наполнителей эпоксидных клеев. Рассматривались структурные, энергетические сдвиговые характеристики межфазного слоя с наполнителем. Полученные результаты показывают, что самым эффективным наполнителем, показывающим самые высокие механические сдвиговые показатели открытые углеродные нанотрубки. В этих случаях частицы наполнителя удерживаются фрагментами эпоксидных цепей как водородными, так и Ван-дер-Ваальсовыми, дисперсионными силами. Таким образом открытые углеродные нанотрубки перспективно использовать в качестве наполнителей эпоксидных клеев.

Взаимодействие фрагментов эпоксидных цепей с боковыми стенками углеродных нанотрубок несколько слабее, чем с открытыми концами, поэтому, по возможности, надо стремиться к открытию концов трубок перед наполнением эпоксидных клеев, а также, по возможности, необходимо использовать короткие трубки, чтобы увеличить долю открытых концов на удельное содержание наполнителя в эпоксидном клее. По энергии взаимодействия и силе сдвигового трения боковые поверхности углеродных нанотрубок практически имеют те же показатели межфазных слоев, что и другие из рассмотренные ароматические системы, как фуллерен.

2.3 Выбор способа диспергирования и типа углеродных наномодифицирующих компонентов

При создании высокоэффективных наномодифицированных клеевых композиций на основе эпоксидных полимеров с существенным повышением механических характеристик (собственной прочности, вязкости и твердости) ключевое значение имеет равномерность распределения наномодифицирующего материала в полимерной матрице.

Углеродные нанотрубки в отличие от других наполнителей (ораноглин, наночастицы) обладают гладкой поверхностью в атомном масштабе. Макромолекулы матричного полимера растягиваются на этой поверхности и происходит образование плотноупакованного межфазного слоя полимерной матрицы с углеродными нанотрубками.

Для получения нанокомпозитов необходимо равномерно перемешать матрицу и наполнитель. В настоящее время разработано несколько методов диспергирования углеродных нанотрубок в полимере, например, перемешивание раствора, метод плавления и *in situ* полимеризация.

Перемешивание раствора

Перемешивание раствора является самым простым и широко используемым методом для получения полимерных композитов с углеродными нанотрубками. Этот метод заключается в перемешивании полимера и углеродных нанотрубок в присутствии растворителя, который испаряют после образования нанокompозитных пленок на поверхности подложки. Метод перемешивания раствора имеет ограничение – растворимость полимеров в растворителе. Этот метод подходит для таких полимеров, как полиметилметакрилат, поливинилацетат, полистирол [89-91]. В работах [91-92] был использован ультразвуковой метод диспергирования многослойных углеродных нанотрубок в полимерной матрице. Исследования [93] показали, что для равномерного диспергирования необходимо модифицировать поверхность углеродных нанотрубок функциональными группами. Однако проблема заключалась в совместимости функциональных групп с полимерной матрицей. Авторы статей [94-95] для решения этой проблемы при диспергировании углеродных нанотрубок добавляли ПАВ. При этом структура углеродных нанотрубок оставалась неизменной. В некоторых случаях после испарения растворителя происходило агломерирование. Для того, чтобы избежать этого, исследователи [89] предложили центрифугировать образец. Еще одним методом является электроформование, в котором обработка полимерных волокон происходит в присутствии электрического поля [96-97].

Метод плавления

Другим альтернативным методом для получения полимерных нанокompозитов является метод плавления. Этот метод обычно применяется для термопластичных полимеров, например полипропилена, полистирола, поликарбоната и т.д. [98-100]. Метод заключается в плавлении полимера до состояния вязкой жидкости и последующим смешением с углеродными нанотрубками. Диспергирование углеродных нанотрубок может быть улучшено экструзией и методом формования [98, 101-102]. Этот метод является менее эффективным, чем перемешивание раствора, из-за высокой вязкости термопластичных полимеров, приводящей к неравномерному диспергированию

углеродных нанотрубок [103]. В ряде исследований было использовано кручение волокна, которое привело к удлинению образцов волокон [104-105].

In situ полимеризация

In situ полимеризация заключается в диспергировании углеродных нанотрубок в матрице мономера в присутствии или в отсутствии растворителя, следующим за стандартными методами полимеризации. В этом методе исходным материалом являются мономеры, а не полимеры. Основным преимуществом данного метода считается прикрепление полимерных молекул к углеродным нанотрубкам, которое приводит к лучшему диспергированию и эффективному взаимодействию между углеродными нанотрубками и полимерной матрицей. Этот метод обычно используется для нерастворимых в воде и термонестабильных полимеров, а также для таких полимеров, к которым не могут быть применены методы перемешивания раствора и плавления.

In situ полимеризацией были получены полимерные композиты, армированные многослойными углеродными нанотрубками, с различными матрицами из полистирола, полиуретана, полиэтилена, полипиррола, нейлона и др. [106-108]. Большое количество исследований было посвящено нанокompозитам, содержащим в качестве высокоэффективных связующих эпоксидные смолы [109-112].

Ультразвуковое диспергирование

На сегодняшний момент эффективность большинства выше указанных методов достигла своего предела, а диспергирование нанонаполнителей в высоковязких полимерах в некоторых случаях практически неосуществимо. Повышение возможностей модификации дает ультразвуковая технология диспергирования нанонаполнителей. При этом воздействие ультразвуковой обработки компаунда с нанонаполнителем оказывает деструктивное воздействие на наполнитель, что приводит к разламыванию волокон наполнителя непосредственно в эпоксидной смоле. Разломы волокон, как было показано выше, теоретически обладают, наряду с оксидом графена, наиболее высокими механическими сдвиговыми показателями при взаимодействии с молекулами

полимерного компаунда. Таким образом, для модифицирования полимерного связующего целесообразно применять ультразвуковое диспергирование. Однако при выборе режимов (мощности и длительности воздействия) стоит учитывать недопустимость существенного нагрева компаунда, что может негативно отразиться на его механических характеристиках.

Углеродные нанотрубки марки «Таунит-М»

Теоретически определено, что наиболее эффективными при взаимодействии с молекулами полимерного компаунда являются нано-частицы оксида графена. При этом стоит учитывать высокую химическую активность данного материала и склонность к взаимному притяжению, приводящему к их слипанию и агрегированию, что осложняет его диспергирование при объединении частиц в агломераты, а также дороговизну его производства. Следующим (см. Таблицу 2.2) для повышения механических характеристик (модуль упругости, прочность, вязкость) клеевой композиции, теоретически являются углеродные нано-трубки с открытыми концами, получаемыми при из разламывании в процессе диспергирования. Также важно чтобы нано-частицы не взаимодействовали между собой, образуя агломераты, которые полностью невозможно раздвинуть.

Для применения в разрабатываемой нано-клеевой композиции был выбран нано-материал «Таунит-М». Углеродные многослойные нано-волокна «Таунит-М» имеют сравнительно невысокую химическую активность и при воздействии ультразвукового диспергирования возможно разрушение их агломератов.

Углеродные нанотрубки были получены ООО «НаноТехЦентром» методом газофазного химического осаждения углерода в процессе каталитического пиролиза углеводородов (этан, пропан, бутан) в неподвижном слое полидисперсного катализатора. Для синтеза использовались металлоокисные Ni/Mg катализаторы. Условия получения углеродных нанотрубок были следующие: атмосферное давление, температура пиролиза 580 - 650 °С. При данных условиях получались углеродные нанотрубки марок «Таунит», «Таунит-М», «Таунит-МД».

Углеродные нанотрубки марки «Таунит-М» представляют собой наноразмерные квазиодномерные нитевидные образования поликристаллического графита цилиндрической формы с внутренним каналом. Микрофотографии полученных нанотрубок представлены на рисунке 2.9. ПЭМ-изображения были получены в Институте кристаллографии РАН (г. Москва), СЭМ-изображения – в НОЦ «Нанотехнологии и наноматериалы» (г. Тамбов) на двухлучевом сканирующем электронном микроскопическом комплексе Neon 40, Carl Zeiss.

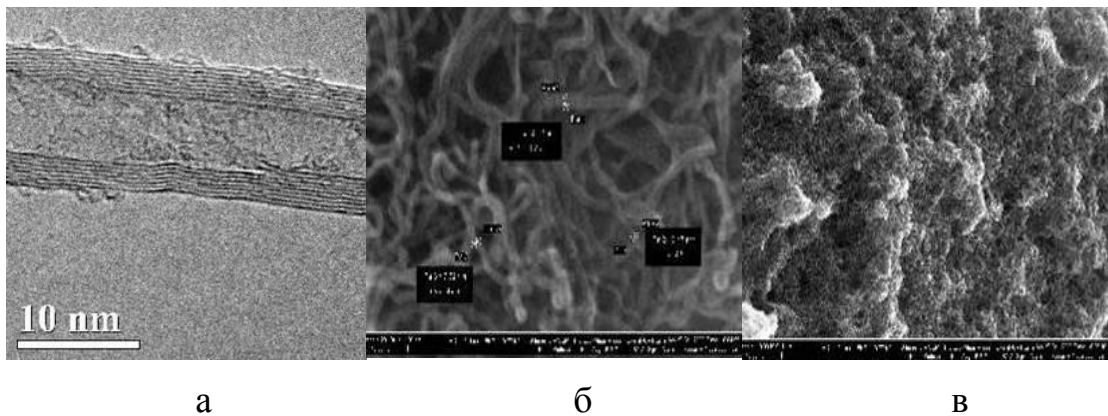


Рисунок 2.9 – Микрофотографии углеродных нанотрубок «Таунит-М» с просвечивающего (а) и сканирующего (б, в) электронных микроскопов

В таблице 2.3 представлены характеристики углеродных нанотрубок типа «Таунит-М».

Для улучшенной совместимости с эпоксидной смолой углеродные нанотрубки окисляли в концентрированной азотной кислоте при кипячении. Наличие карбоксильных групп было подтверждено методом ИК-спектроскопии и титрованием щелочью водной дисперсии. Концентрация карбоксильных групп составила 0,6 ммоль/г.

Таблица 2.3 – Характеристики углеродных нанотрубок типа «Таунит-М»

| Параметры | Значения |
|--|-------------------|
| Наружный диаметр, нм | 8 ÷ 15 |
| Внутренний диаметр, нм | 4 ÷ 8 |
| Длина, мкм | 2 и более |
| Общий объем примесей до очистки, % | до 5 |
| после очистки, % | до 1 |
| Насыпная плотность, г/см ³ | 0,03 ÷ 0,05 |
| Удельная геометрическая поверхность, м ² /г | 300 ÷ 320 и более |
| Термостабильность, °С | до 600 |

Выбор режимов ультразвукового диспергирования и концентрации модифицирующего nano-материала.

Определение рациональной концентрации nano-частиц «Таунит-М» и параметров ультразвукового диспергирования производились параллельно, т.к. критерием качества диспергирования наночастиц в смеси являлись результаты испытаний на прочность при сдвиге контрольных образцов клеевых соединений изготовленных на текущем этапе.

С применением наноэпоксидной дисперсии, полученной при воздействии при диспергировании на смесь наночастиц со смолой трех импульсов ультразвуковых колебаний общей длительностью до 100 секунд с охлаждением после каждого импульса до комнатной температуры и при воздействии при диспергировании на смесь наночастиц со смолой одного импульса ультразвуковых колебаний длительностью до 100 секунд без охлаждения до комнатной температуры, были изготовлены и испытаны образцы клеевых соединений из сплава Д16АТ, которые показали, что предел прочности при сдвиге образцов клеевого соединения на основе клея, изготовленного с применением полученной при диспергировании наноэпоксидной дисперсии, во втором случае уменьшается ~ на 8% при увеличении температуры смеси наночастиц со смолой в конце диспергирования ~ в 1,5 раза по сравнению с конечной температурой смеси в конце воздействия кратковременных импульсов первого случая диспергирования. Одной из причин такого уменьшения прочности является возможное начало деструкции

эпоксидной смолы, вызванное повышенной температурой при одновременном воздействии на смолу ультразвуковых колебаний. Основываясь на данных проведенных исследований для того, чтобы температура при изготовлении наноэпоксидной дисперсии не приводила к уменьшению предела прочности при сдвиге образцов клеевого соединения на основе клея, изготовленного с применением полученной при диспергировании наноэпоксидной дисперсии, необходимо охлаждать смесь до комнатной температуры после воздействия каждого из нескольких коротких импульсов ультразвуковых колебаний с общей длительностью, не превышающей 100 секунд, или при воздействии одного импульса ультразвуковых колебаний длительностью не более 100 секунд, осуществлять охлаждение с измерением температуры в процессе воздействия импульса и при этом производят охлаждение смеси так, чтобы ее температура была не выше 95°C в зависимости от вида смолы и объема приготавливаемой смеси.,

Первый вариант охлаждения смеси при диспергировании использован при доведении предложенного способа до практической реализации.

2.4 Выбор рациональной концентрации модифицирующего нано-материала

Для определения оптимального, соответствующего максимальной прочности клеевого соединения, концентрации наночастиц наноматериала Таунит в клее холодного отверждения ВК-27 были изготовлены и испытаны на прочность при сдвиге 24 образца из сплава Д16АТ по ГОСТ 14756-69, рисунок 2.10. Массовые концентрации нано-волокон варьировались от 0.5 до 2%, т.к. технически концентрации менее 0.5% смешать в малых лабораторных объемах не представлялось возможным. Результаты этих испытаний приведены в таблице 2.4.

СТАНДАРТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

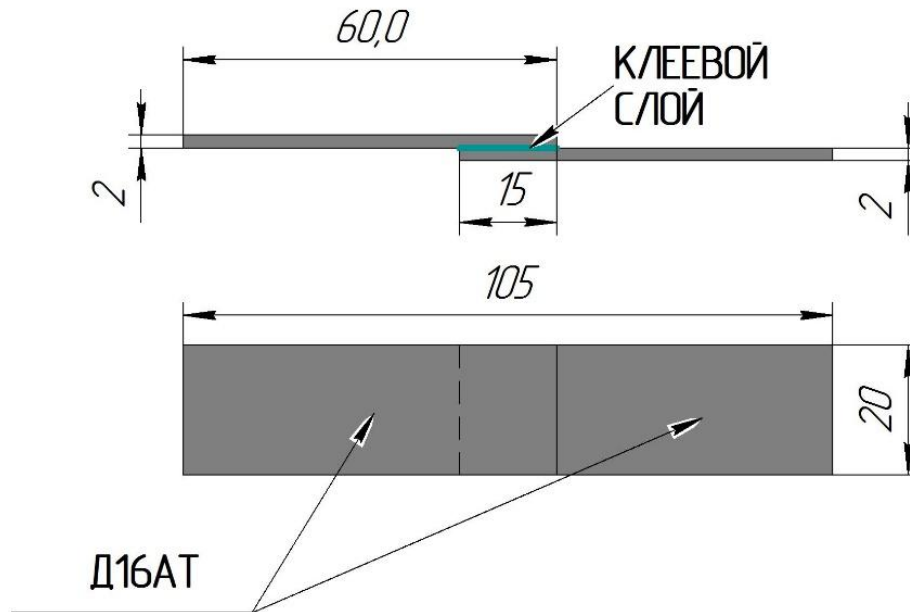


Рисунок 2.10 – Схема образца для испытания клеевого соединения элементов из сплава Д16АТ, по ГОСТ 14756-69

Результаты испытаний показывают существенное (до 19 - 26%) увеличение предела прочности наномодифицированного клеевого соединения по сравнению с пределом прочности исходного клеевого соединения. Прочность клеевого соединения практически постоянна при концентрации наночастиц в клее 1 и 2 %. При концентрации наночастиц в клее, равной 1%, коэффициент вариации предела прочности при сдвиге клеевого соединения имеет наименьшее значение (5,3%). Повышение прочности клеевого соединения за счет введения в клей наночастиц происходит без уменьшения предельных деформаций клеевого слоя, т. е. охрупчивания клеевого слоя в проведенных экспериментах не наблюдается.

В таблице 2.4 представлены результаты испытаний нано-модифицированной клеевой композиции с концентрацией УНТ 1%, в том числе при повышенной температуре испытаний (80⁰С) и применении вакуумирования клеевого слоя с целью уменьшения воздушных пор и увеличения площади соединения.

Таблица 2.4 – Результаты испытаний на прочность при сдвиге образцов клеевого соединения с использованием клея ВК-27 с концентрацией углеродного наноматериала Таунит, изменяющейся в диапазоне от 0 до 2 %. (Материал образца - Д16АТ АнОкс.Хром., длина образцов 105 мм, ширина 20 мм, длина нахлестки 15 мм, скорость растяжения образцов при испытаниях 10 мм/мин; испытания проведены в ООО НПФ «ТЕХПОЛИКОМ»)

| Концентрация наночастиц, % | № образца | Площадь склеивания, мм ² | Разрушающее усилие, Н | Предел прочности Н/мм ² | Статистические характеристики |
|----------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|--|
| 0 | 1 | 301,41 | 6829 | 22,657 | Среднее 23,6 Н/мм ² СКО 1,6 Н/мм ² Вариация 7,0% |
| | 2 | 297,92 | 6982 | 23,436 | |
| | 3 | 294,00 | 7531 | 25,616 | |
| | 4 | 300,00 | 7354 | 24,513 | |
| | 5 | 300,00 | 6277 | 20,923 | |
| | 6 | 296,40 | 7230 | 24,393 | |
| 0,5 | 1.05 | 300,00 | 7681 | 25,603 | Среднее 26,2 Н/мм ² СКО 1,9 Н/мм ² Вариация 7,3% |
| | 2.05 | 281,30 | 7639 | 27,156 | |
| | 3.05 | 272,64 | 7961 | 29,2 | |
| | 4.05 | 279,74 | 6985 | 24,97 | |
| | 5.05 | 268,80 | 6368 | 23,69 | |
| | 6.05 | 286,65 | 7664 | 26,83 | |
| 1 | 1.1 | 280,80 | 7419 | 26,421 | Среднее 28 Н/мм ² СКО 1,5 Н/мм ² Вариация 5,3 % |
| | 2.1 | 278,85 | 7504 | 26,911 | |
| | 3.1 | 292,00 | 8344 | 28,575 | |
| | 4.1 | 284,00 | 8043 | 28,32 | |
| | 5.1 | 284,00 | 8673 | 30,539 | |
| | 6.1 | 290,00 | 7935 | 27,362 | |
| 2 | 1.2 | 292,50 | 8099 | 27,689 | Среднее 28 Н/мм ² СКО 1,7 Н/мм ² Вариация 6% |
| | 2.2 | 289,06 | 7926 | 27,42 | |
| | 3.2 | 292,50 | 9108 | 31,138 | |
| | 4.2 | 283,71 | 7767 | 27,377 | |
| | 5.2 | 287,12 | 8080 | 28,142 | |
| | 6.2 | 286,16 | 7473 | 26,115 | |

Таблица 2.5 – Результаты испытаний при нормальной и повышенной температуре (80⁰С) на прочность при сдвиге образцов клеевого соединения с использованием клея конструкционного назначения с концентрацией углеродного наноматериала Таунит 0 и 1 % без и с вакуумированием клеевого слоя. (Материал образца - Д16АТ АнОкс.хром., длина образцов 105 мм, ширина 20 мм, длина нахлестки 15 мм, скорость растяжения образцов при испытаниях 10 мм/мин; испытания проведены в ООО НПФ «ТЕХПОЛИКОМ»)

| Концентрация наночастиц, % | Температура испытаний, °С | Требуемое среднее значение предела прочности τ согласно ПИ 1.2А.145-99, Н/мм ² | Экспериментальные значения предела прочности τ | | | |
|--------------------------------|------------------------------|---|---|-------------------------------|--|--|
| | | | № образца | τ , Н/мм ² | Среднее и минимальное значения τ , Н/мм ² | Увеличение предела прочности τ , % |
| 0 | 20 | 22,55 | 1 | 22,657 | 23,6/20,92 | - |
| | | | 2 | 23,436 | | |
| | | | 3 | 25,616 | | |
| | | | 4 | 24,513 | | |
| | | | 5 | 20,923 | | |
| | | | 6 | 24,393 | | |
| 1 | 20 | - | 1.1 | 26,421 | 28/26,42 | 19% / 26% 24% (по отношению к требуемому согласно ПИ 1.2А.145-99) |
| | | | 2.1 | 26,911 | | |
| | | | 3.1 | 28,575 | | |
| | | | 4.1 | 28,32 | | |
| | | | 5.1 | 30,539 | | |
| | | | 6.1 | 27,362 | | |
| 1+вакуумирование клеевого слоя | 20 | - | 1.1В | 26,075 | 26,4/25,703 | 22% 17% (по отношению к требуемому согласно ПИ 1.2А.145-99) |
| | | | 2.1В | 25,703 | | |
| | | | 3.1В | 27,381 | | |
| 0 | 80 | 8,33 | - | - | - | - |
| 1+вакуумирование клеевого слоя | | - | 1.1ВТ | 10,494 | 10,2/9,4767 | 22% (по отношению к требуемому согласно ПИ 1.2А.145-99) |
| | | | 2.1ВТ | 10,493 | | |
| | | 3.1ВТ | 9,4767 | | | |

По данным таблицы 2.5 видно, что при нормальной температуре испытаний значения средней прочности клеевого соединения за счет влияния наномодифицирования увеличивается соответственно на 24% (согласно инструкции ПИ 1.2А.145-99).

Также показано, что получено повышение средней прочности образцов клеевых соединений по сравнению с требуемой согласно инструкции ПИ 1.2А.145-99 средней прочностью при нормальной температуре испытаний после

наномодифицирования и вакуумирования клеевого слоя на 17% (что ниже на 7% средней прочности этих образцов, полученной за счет наномодифицирования без вакуумирования клеевого слоя) и повышение средней прочности этих образцов при повышенной температуре испытаний (80⁰С) на 22% .

Такое значительное повышение прочности клеевых соединений при нормальной и повышенной температуре за счет совместного влияния наномодифицирования и вакуумирования позволяет окончательно перейти на систематическое применение операций вакуумирования при создании наномодифицированных клеевых соединений.

Предполагается также, что в конструкции авиационной техники (в том числе самолета МС-21) детали из углепластика будут соединены болтовыми соединениями с ответными деталями из титановых сплавов. Таким образом, в случае применения клеевых и наномодифицированных клеевых и клееболтовых соединений углепластика с титановыми сплавами, соединяемыми клеевым и наномодифицированным клеевым слоем, могут быть поверхности титанового сплава и стеклопластика. Для определения прочности при сдвиге таких соединений были изготовлены образцы (рисунки 2.11-2.12) клеевых и наномодифицированных клеевых соединений полос титанового сплава ВТ-6 с полосой из стеклопластика при 0 и 2% концентрации наночастиц наноматериала Таунит в клее ВК-27. Результаты испытаний этих образцов приведены в таблице 2.6

Таблица 2.6 – Результаты испытаний на прочность при сдвиге образцов клее-вого соединения титанового сплава ВТ-6 со стеклопластиком использованием клея ВК-27 с концентрацией углеродного наноматериала Таунит 0 и 2%. (длина образцов 200 мм, ширина 20 мм, длина нахлестки 15 мм, скорость растяжения образцов при испытаниях 10 мм/мин. Испытания проведены в ЦАГИ)

| Концентрация наночастиц, % | № образца | Площадь склеивания, мм ² | Разрушающее усилие, Н | Предел прочности, Н/мм ² | Среднее значение предела прочности, Н/мм ² |
|----------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|
| 0 | СТ-1к | 290 | 6276 | 21,67 | 20,23 |
| | СТ-2к | 282,8 | 5178 | 18,34 | |
| | СТ-3к | 271 | 5913 | 20,69 | |
| 2 | СТ-1кН2 | 282,8 | 6894 | 24,42 | 23,68 |
| | СТ-3кН2 | 284 | 6512 | 22,95 | |

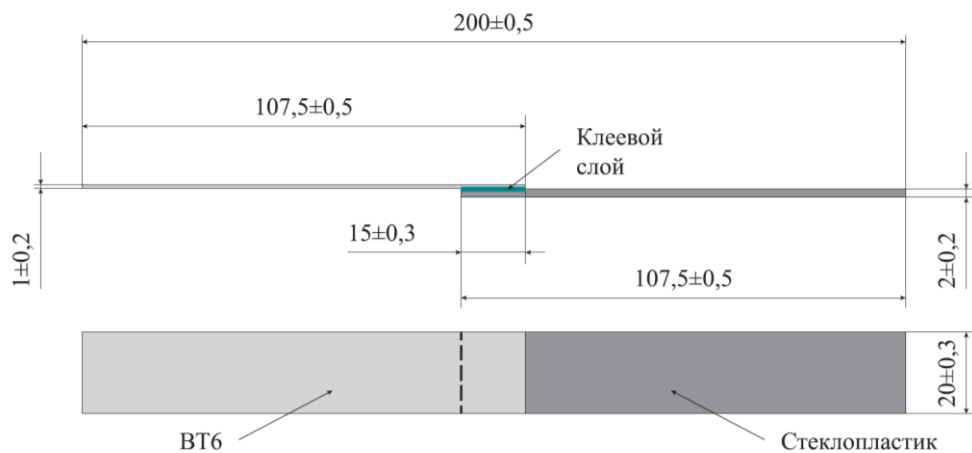


Рисунок 2.11 – Схема образца для испытания клеевого соединения элементов из стеклопластика и титанового сплава

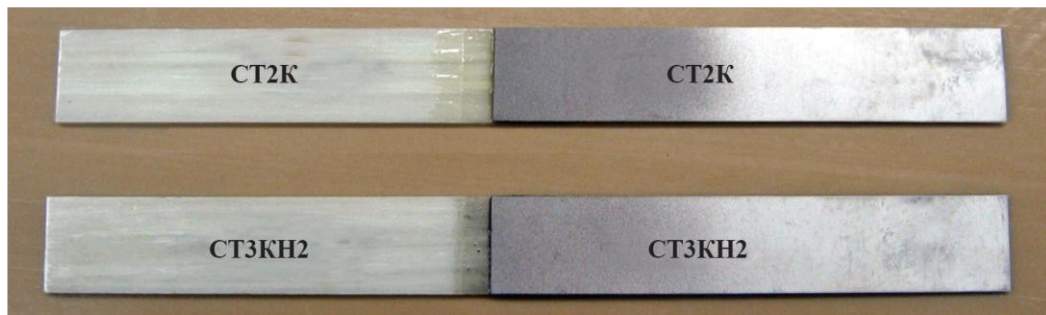


Рисунок 2.12 – Образцы для испытания клеевого соединения элементов из стеклопластика и титанового сплава

По данным таблицы 2.6 видно, что введение 2% наночастиц в клей приводит к увеличению прочности при сдвиге клеевого соединения титанового сплава со стеклопластиком на 17%.

Наряду с повышением механических характеристик клеевой композиции представляет интерес и сохранение ей полученных прочностных характеристик при хранении. В таблице 2.7 представлены результаты контрольных испытаний клеевой композиции с разницей во времени более чем через год после испытаний опытного варианта НМК. По данным испытаний видно, что клеевая композиция сохраняет свои высокие прочностные свойства не менее чем в течении одного года, что соответствует сроку годности базовой клеевой композиции. Также при визуальном осмотре компонент клеевой композиции образования осадка черного цвета не обнаружено, цвет и прозрачность композиции не изменяется по высоте.

Таблица 2.7 – Результаты контрольных испытаний на прочность при сдвиге образцов клеевого соединения с использованием наномодифицированной клеевой композиции с концентрацией наночастиц 2% (Материалы образцов – Д16АТ АнОкс.хром, стеклопластик – титановый сплав ВТ-6, угле- стеклопластик - титановый сплав ВТ-6, длина образцов 105 и 200 мм, ширина 20 мм, длина нахлестки 15 мм, скорость растяжения образцов при испытаниях 10 мм/мин; испытания проведены в ООО НПФ «ТЕХПОЛИКОМ» и ЦАГИ)

| Материал образцов | Среднее значение прочности при сдвиге τ_v , Н/мм ² | |
|------------------------------------|--|--------------------------------------|
| | Определено при испытаниях опытных образцов | при контрольных испытаниях через год |
| Д16АТ АнОкс.хром | 28 | 28,68 |
| Стеклопластик-титановый сплав ВТ-6 | 23,68 | 24,85 |
| Углепластик-титановый сплав ВТ-6 | - | 25,42 |

2.5 Экспериментальная оценка характеристик разработанной наномодифицированной клеевой композиции

Наряду с косвенным определением повышения прочности клеевой композиции за счет модифицирования нанокремнеземными компонентами по результатам испытаний образцов соединений возможна прямая оценка ее механических характеристик методом наноиндентирования.

Для исследования свойств материалов методом наноиндентирования в настоящей работе применялся измерительный комплекс NanoTest 600 (Micro Materials Ltd., Англия), позволяющий определять механические свойства широкого спектра материалов и покрытий в нано- и микромасштабе.

Суть метода наноиндентирования заключается во внедрении геометрически и физически аттестованной пирамиды (пирамида Берковича с углом при вершине $65,3^\circ$ и радиусом закругления 200 нм) в материал и определении с высокой точностью зависимости нагрузка – глубина индентирования [113-115]. При расчёте приведённого модуля упругости применялся метод Оливера-Фарра, в соответствии с которым обрабатывалась часть зависимости нагрузка - глубина индентирования на цикле разгрузки. Схема эксперимента по наноиндентированию представлена на рис. 2.13.

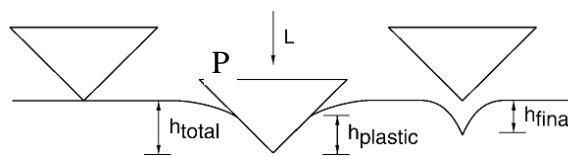


Рисунок 2.13 – Схема эксперимента по наноиндентированию, где h_{total} – максимальная глубина индентирования (h_{max});

Где $h_{plastic}$ – пластическое внедрение (h_c); h_{final} – необратимое внедрение; P – нагрузка.

Пластическое внедрение (h_c) (рис. 3) определяется из уравнения:

$$h_c = h_{max} - \varepsilon(CP_{max}) \quad (1)$$

где, C – это податливость контакта (эквивалентна тангенсу угла наклона кривой разгрузки при максимальной нагрузке). Значение ε зависит от геометрии индентора, для индентора Берковича $\varepsilon = 0,75$. P_{max} – максимальная нагрузка.

Функция зависимости площади контакта от глубины погружения $A(h_c)$ определяется при калибровке прибора на специальном калибровочном образце – плавном кварце.

Для вычисления приведённого модуля упругости образца обрабатывается часть кривой при разгрузке в соответствии с соотношением:

$$C = \frac{dh}{dP} = \frac{\pi^{0,5}}{2E_r A^{0,5}} \quad (2)$$

где C – податливость контакта, а E_r – приведённый модуль, который связан с модулем упругости соотношением:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (3)$$

где ν_s – коэффициент Пуассона образца, ν_i – коэффициент Пуассона индентора (0,07 [113-114]), E_s – модуль упругости образца, E_i – модуль упругости индентора (1141 GPa [113-114]). Таким образом, зная значение E_r – приведённый модуль, которое прибор определяет из соотношения (2) при обработке экспериментальных данных, по уравнению (3) можно рассчитать модуль упругости образца или плёнки на поверхности образца [115].

В настоящей работе для нивелирования возможного эффекта ползучести полимерной клеевой композиции в ходе эксперимента осуществлялась задержка при максимальной нагрузке в течении 100 секунд. Также в ходе проведения эксперимента с помощью опции пьезопрофилометра прибора снимался профиль поверхности образцов. На основе полученных данных с пьезопрофилометра прибора NanoTest 600 для индентирования выбирались определённые области на поверхности образца с целью уменьшения влияния её шероховатости на точность определения механических свойств образцов. Результаты экспериментов по наноиндетированию представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8 – Механические характеристики клеевых композиций, полученные на измерительном комплексе NanoTest 600 методом наноиндентирования, для исходного образца и образца с углеродными нанотрубками (2% масс)

| Образец | Образец 1 (ИСХ) | | Образец 2 (УНТ) | |
|---|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| Нагрузка | 0,2 мН | | 0,2 мН | |
| Параметр | Значение | разброс, % | Значение | разброс, % |
| Максимальная глубина индентирования (внедрение), нм | 223,4 | 10,7 | 193,0 | 6,3 |
| Пластическое внедрение, нм | 187,2 | 12,4 | 160,0 | 7,3 |
| Твёрдость, МПа | 208,9 | 19,5 | 273,7 | 13,0 |
| Приведённый модуль упругости, ГПа | 3,6 | 14,9 | 4,6 | 16,0 |
| Упругое восстановление | 0,20 | 12,5 | 0,21 | 15,9 |
| Податливость контакта, нм/мН | 240,3 | 7,5 | 220,3 | 13,0 |
| Пластическая работа (рассеянная в образце энергия), нДж | 0,017 | 28,8 | 0,016 | 9,8 |
| Упругая работа (работа при разгрузке), нДж | 0,007 | 6,3 | 0,006 | 10,6 |

Полученные экспериментальные данные говорят о том, что введение углеродных нанотрубок в клеевые композиции даже в малых концентрациях (до 2% масс.) приводит к увеличению их упругих свойств. Особенно это проявляется при малых нагрузках (0,2 мН): полученный приведённый модуль упругости составляет 3,6 ГПа – для исходной композиции и 4,6 ГПа для композиции с углеродными нанотрубками.

Также увеличивается твёрдость для образцов с нанотрубками (исходный – 208 МПа, с нанотрубками – 273 МПа при 0,2 мН). Следует отметить значительный

разброс полученных показателей в эксперименте по наноиндентированию, что, видимо, связано с особенностями подготовки образцов клеевой композиции.

2.6 Предварительные результаты применения наномодифицированной клеевой композиции

Конструкция технологического проема с упрочненными кромками

С использованием наноклеевой композиции были проведены испытания на потерю устойчивости при сдвиге образца, моделирующего фрагмент стенки нервюры крыла, изготовленного из углепластика толщиной 2,2 мм, имеющего вырез в виде отверстия диаметром 80 мм (рис.2.14). На рис. 2.15 показаны соответственно микродефекты на кромке отверстия после изготовления образца и вид кромки отверстия, упрочненной наноклеевой композицией, а на рис. 2.16 – соответственно исходный образец и образец с упрочненным наноклеевой композицией отверстием после испытаний на потерю устойчивости при сдвиге.

При испытаниях определялся момент начала потери устойчивости по показаниям тензодатчиков, наклеенных на противоположные поверхности образца. В эксперименте были применены также лазерные датчики перемещения. В процессе нагружения производилась непрерывная запись показаний тензодатчиков и лазерных датчиков, осуществлялся визуальный контроль за поведением деформируемого образца и проводилась видеосъемка процесса его деформирования и разрушения.

Нагружение образца вызывало потерю устойчивости с образованием волны выпучивания, растрескивание и отслаивание поверхностных слоев в зоне развивающейся волны. Последующее деформирование приводило к интенсивному отслаиванию поверхностных слоев углепластика, сопровождающимся разрушением образца на контуре отверстия в зоне концентрации растягивающих напряжений. В образце с залеченными наномодифицированной клеевой композицией микродефектами на кромках и поверхности отверстия и

упрочненным ею отверстием зона начала расслаивания смещается от края отверстия, что приводит к повышению несущей способности образца.

Результаты испытаний исходных и упрочненных нанокompозицией образцов в виде значения нагрузок, соответствующих началу потери их устойчивости, приведены в таблице 2.9

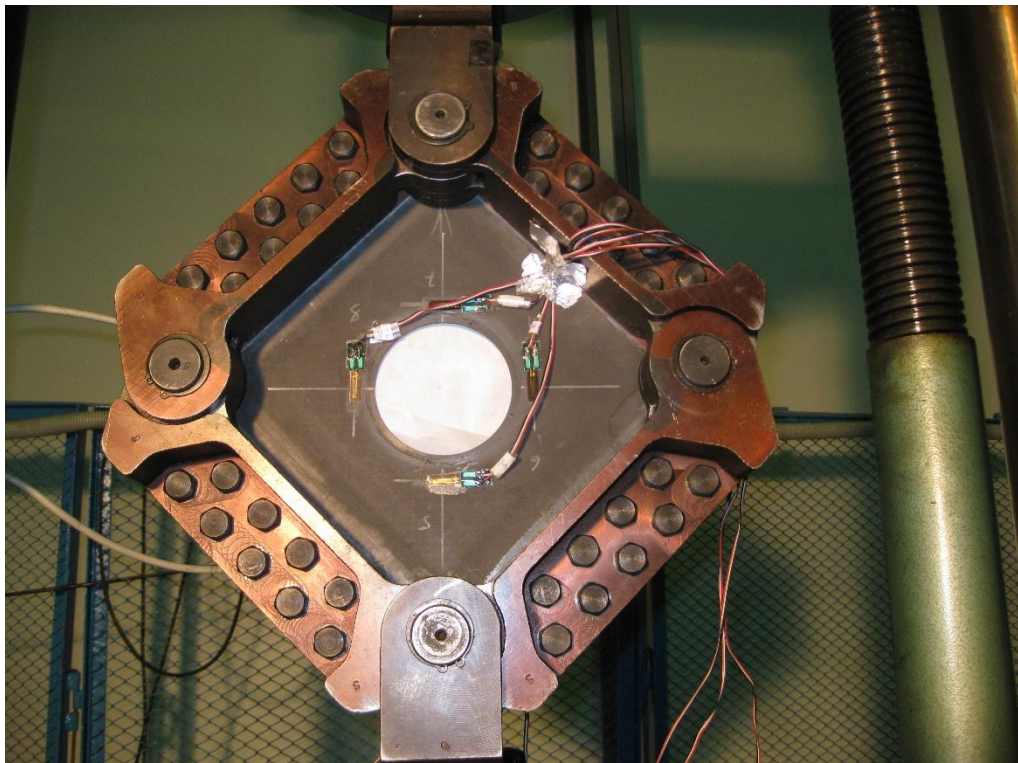
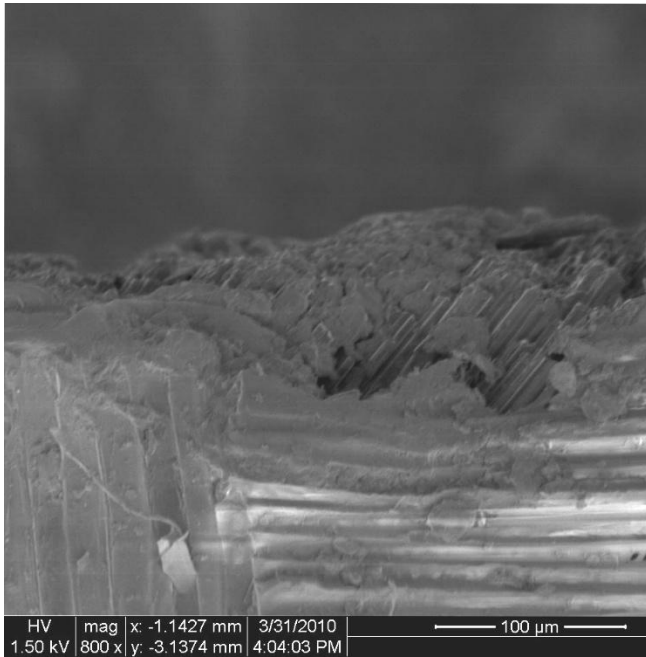
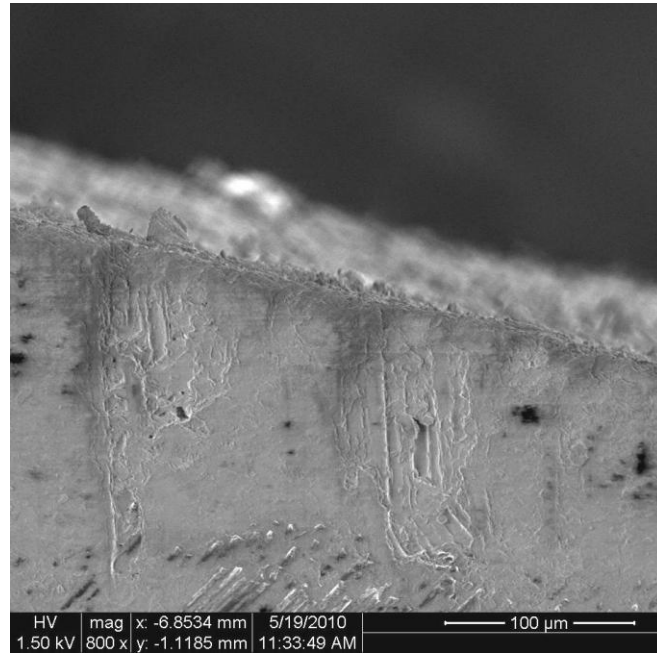


Рисунок 2.14 – Фотоизображение образца из углепластика, моделирующего фрагмент стенки нервюры крыла, в приспособлении для испытаний, установленном в захватах испытательной машины



А) Микродефекты на кромке отверстия после изготовления образца, моделирующего фрагмент стенки нервюры



Б) Вид кромки отверстия в образце, упрочненной наноклеевой композицией

Рисунок 2.15 – Изображение обработанной кромки детали из ПКМ



А) Исходный



Б) Образец с упрочненным наноклеевой композицией отверстием

Рисунок 2.16 – Образец после испытаний на потерю устойчивости при сдвиге

Таблица 2.9 – Результаты испытаний на потерю устойчивости при сдвиге образцов из углепластика, моделирующих фрагмент стенки нервюры крыла

| Вид образца | № образца | Нагрузка начала потери устойчивости образца Р, тонны | Среднее значение нагрузки начала потери устойчивости Р, тонны | Отношение $P_{(нк)}/P$ |
|------------------------------------|-----------|--|---|------------------------|
| Исходный | 002 | 1,5 | 1,9 | - |
| | 003 | 2,3 | | |
| С упрочнением нанокompозицией (нк) | 004 | 2,5 | 2,5 | 1,32 |

По данным таблицы 2.9 видно, что за счет применения наноклеевой композиции нагрузка начала потери устойчивости образца повышается на 32 %. Это достигнуто в результате залечивания повреждений, возникающих в результате механической обработки углепластика на поверхности и кромках отверстия, уменьшения концентрации напряжений у отверстия, формирования «стоппера» для задержки растрескивания (расслоения) поверхностных слоев при выпучивании, сопровождающемся потерей устойчивости.

Наиболее существенным результатом проведенных испытаний стало изменение места начала возникновения трещин в образце в процессе его нагружения. В исходных образцах трещины и расслоение поверхностных слоев основного материала возникали на кромке отверстия. С нанесенной на поверхность и кромки отверстия наноклеевой композицией начало возникновения трещин произошло в углепластике на удалении от кромки отверстия. В условиях циклического нагружения аналогичного фрагмента стенки нервюры с величиной нагрузок меньших, чем нагрузки начала потери устойчивости, можно предполагать значительного увеличения усталостной долговечности крыла самолета.

Конструкция упрочненного металло-композитного соединения

На начальном этапе исследований для оценки влияния наномодифицированной клеевой композиции на прочность при воздействии на образец сосредоточенных контактных нагрузок, имеющих место в болтовых соединениях из композиционных материалов, был применен образец из углепластика, аналогичный образцу типа проушины с нагруженным болтом отверстием (Рисунок 2.16). Образец характеризуется отношением диаметра отверстия ($d = 5$ мм) к ширине ($B = 30$ мм) образца $d/B = 5/30 = 0,166$, номинальной толщиной 3,5 мм, величиной отношения расстояния от отверстия до поперечного края образца к ширине образца $H/B = 20/30 = 0,666$. Проведенные ранее исследования [77], [78] показали, что для образцов с нагруженным болтом отверстием зависимость коэффициента концентрации растягивающих на кромке отверстия напряжений K_t брутто от параметра d/B описывается кривой с минимумом, соответствующим значению параметра $d/B = 0,44$. Ориентировочные величины коэффициентов концентрации напряжений для металлических образцов в точке минимума K_t брутто = 4,35, K_t нетто = 2,44. В случае образцов с геометрическими характеристиками, аналогичными предназначенным для исследования образцам (Рисунок 2.16) из углепластика (т. е. при $d/B = 0,166$ и $H/B = 0,666$), ориентировочные значения коэффициентов концентрации напряжений K_t брутто = 7,19, K_t нетто = 6. Эти коэффициенты концентрации напряжений в 1,65 и 2,47 раз больше коэффициентов концентрации напряжений в точке минимума.

Для передачи при испытаниях нагрузки от захватов испытательной машины на вклеенный в отверстие образца штифт было изготовлено приспособление в виде сборно-разборной вилки с отверстием для штифта. Изготовленная вилка состоит из трех пластин, фиксируемых друг с другом перед испытаниями каждого образца двумя болтами, и фактически является составной частью образца штифтового соединения (Рисунок 2.17).

Испытания образцов проводили на электрогидравлической испытательной машине типа Schenck -100 при скорости нагружения 25 кг/сек. В процессе этих

испытаний фиксировали значение предельной нагрузки в момент разрушения образца.

Результаты испытаний на прочность образцов штифтовых соединений (табл. 2.10) показали, что при применении наномодифицированной клеевой композиции прочность при разрушении увеличивается для образцов из углепластика с комбинированной укладкой волокон: продольной 0° (25 и 60,0 %), и под углом 45° (50 и 32,5 %) и под углом 90° (25 и 7,5 %) от 18,0 до 20,5 %.

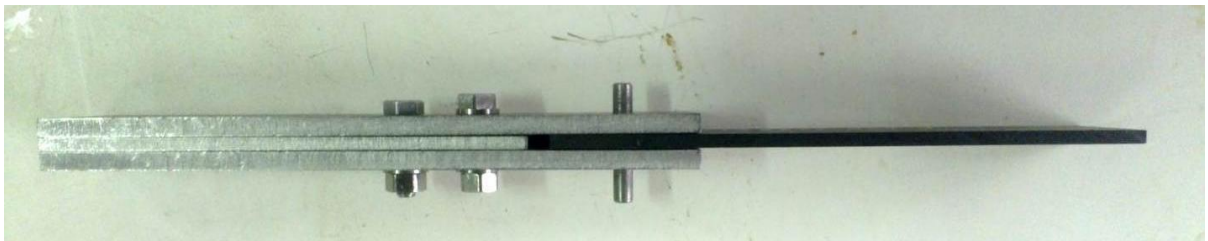
Усталостная долговечность образцов соединений со сложной укладкой волокон при применении клеевой композиции увеличилась не менее чем в 4 раза. Сравнение производилось по минимальному значению усталостной долговечности упрочненных образцов с максимальным значением усталостной долговечности исходных образцов.

Таблица 2.10 – Значения разрушающих напряжений смятия, полученные при испытании на прочность образцов штифтовых соединений (ширина образца $B=30$ мм, диаметр отверстия $d = 5,56$ мм), изготовленных с применением сочетания продольной укладки волокон (25 и 61,5%), укладки их под углом 45° (50 и 30,8%) и укладки под углом 90° (25 и 7,7%) в углепластике при установке штифта в отверстие без применения клея и с применением НМК

| Партия. Ориентация укладки и относитель- ный объем волокон (в %) | Без применения клея | | | | С применением НМК | | | |
|--|---------------------|---------------------------|--|--|-------------------|---------------------------|--|--|
| | № образ- ца | $P_{\text{разр}}$, кг | $\sigma_{\text{см}}$ кг/мм ² | Среднее | № образ- ца | $P_{\text{разр}}$, кг | $\sigma_{\text{см}}$ кг/мм ² | Среднее |
| | | | | $\sigma_{\text{см}}$, кг/мм ² | | | | $\sigma_{\text{см}}$, кг/мм ² |
| D75.15.3.1. $0^\circ \times 45^\circ \times 90^\circ$ 25 x 50 x 25 | 3.1С | 1148 | 62,49 | 61,1 | 2.1СНК | 1264 | 72,76 | 72,53 (увели- чение на 18,7%) |
| | 3.2С | 1097 | 59,72 | | 2.2СНК | 1268 | 72,3 | |
| | | | | | 2.3СНК | 1290 | 72,63 | |
| D75.15.5.1. $0^\circ \times 45^\circ \times 90^\circ$ 61,5x30,8x7,7 | 5.1С | 1034 | 48,14 | 49,01 | 5.1СНК | 1160 | 59,72 | 59,04 (увели- чение на 20,5%) |
| | 5.2С | 1052 | 49,88 | | 5.2СН К | 1108 | 56,37 | |



Рисунок 2.16 Схематичное изображение образца из углепластика со штифтом



А) вид сбоку



Б) вид сверху

Рисунок 2.17 – Фотоизображение образца из углепластика, соединенного штифтом со сборно-разборной вилкой

Выводы к главе 2

1. Анализ взаимодействия углеродных нано-компонент УНК таких как нано-трубки, нано-волокна показывает, что их диспергирование в изотропной клеевой композиции приводит к ее структуризации за счет действия как водородных, так и Ван-дер-Ваальсовых дисперсионных сил. В результате структуризации изотропного клеевого компаунда формируются выраженные зоны уплотнения, что приводит к повышению прочности клеевой композиции, а границы зон уплотнения предотвращают распространение трещин в клеевом слое.

2. Оценка активности УНК на структуризацию клеевой композиции показала, что в наибольшей степени она определяется открытыми концами УНТ, в том числе формируемыми при изломе в процессе диспергирования.

3. Наиболее перспективными нано-углеродными компонентами являются нано-трубки с открытыми концами. Именно они положены в основу исследований

4. Решена задача диспергирования УНК в эпоксидном связующем с обеспечением как излома углеродных нано-трубок, так и их равномерного распределения в клеевой композиции, а также определена рациональная объемная концентрация УНК в составе клеевой композиции.

5. Выполнено экспериментальное определение прочностных характеристик НМК на стандартных методических образцах.

6. Выполнена экспериментальная оценка применения эффективной клеевой композиции для повышения статической прочности и ресурса соединений в металло-композитных конструкциях. Экспериментально показано, что применение наномодифицированной клеевой композиции для упрочнения конструктивно подобных многорядных металло-композитных соединений приводит к повышению прочности при растяжении в среднем более чем на 20%, а усталостной долговечности соединений более чем в 6 раз/

7. Полученные результаты ориентированы на использование при разработке соединений металло-композитных конструкциях включая изготовление крупноразмерных аэродинамических моделей – демонстраторов из композиционных материалов.

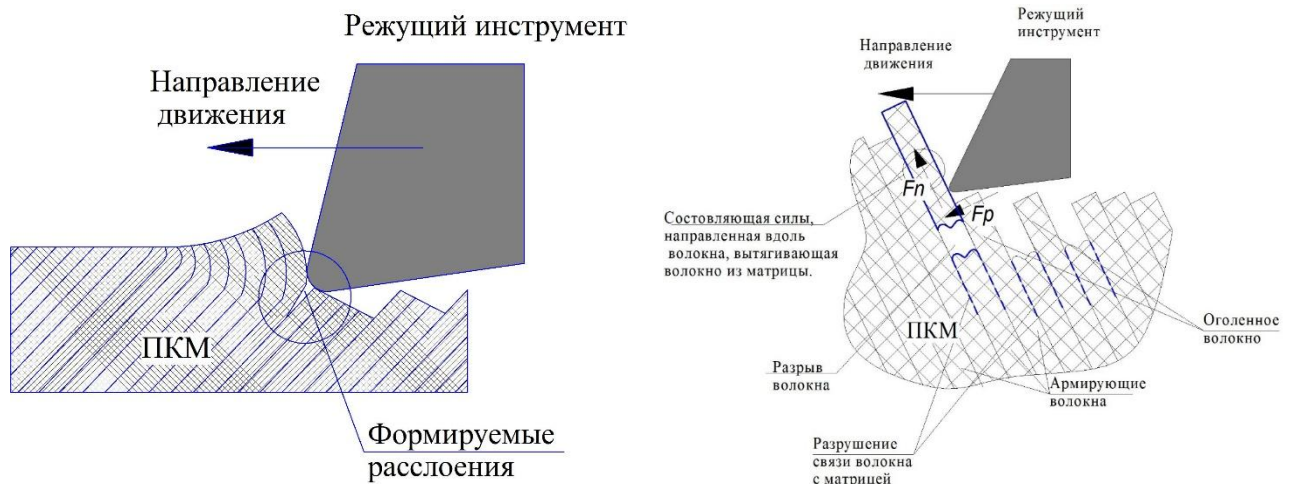
Глава 3. Определение рациональных технологических параметров механической обработки деталей авиационных конструкций из ПКМ для уменьшения повреждений кромок лезвийным инструментом

В главе 1 были рассмотрены основные проблемы снижения прочности и ресурса соединений в металло-композитных авиационных конструкциях. Среди них, прежде всего, это повреждения кромок деталей из ПКМ при проведении механической обработки, а также связанные с изготовлением лезвийным инструментом зазоры в соединениях. Причины выявленных дефектов обусловлены рядом причин, в том числе:

- относительно высокой уязвимости материала, связанной с высокой концентрацией напряжений на границах отверстий;
- расслоения композиционного материала в поперечных направлениях вследствие его слоистой структуры;
- неоднородности свойств композиционного материала и особенностей его взаимодействия с металлическим крепежом, значительно отличающегося от взаимодействия крепежа с металлом;
- существенно меньшей способностью к перераспределению нагрузок по сравнению с металлическими материалами;
- за счет разномодульности полимерной матрицы и углеродного наполнителя невозможно обеспечить плотные посадки крепежного элемента в отверстие детали из ПКМ.

В процессе механической обработки композитных материалов на основе углеродного волокна лезвийным инструментом происходит хрупкий излом. Режущая кромка обычно хрупко разрушает матрицу (связующее) и срезает армирующие волокна. При этом важным становится обеспечение минимальной силы резания, которая достигается остротой режущей кромки, большим задним углом и малым радиусом режущей кромки для обеспечения среза волокон с низкой шероховатостью рабочих поверхностей, для улучшения отвода стружки и снижения сил трения между поверхностями инструмента и заготовки.

Стоит также учитывать, что воздействие фрезы вызывает разрушение кромок внутри отверстия – вырывание и вытягивание волокон наполнителя, растрескивание связующего [30]. Механизм формирования характерных дефектов как за счет сколов полимерного связующего, так и ограниченного вытягивания волокон наполнителя из матрицы до их разрушения показан на рисунке 3.1.



а) формирование расслоение в ПКМ

в) вытягивание волокон

Рисунок 3.1 – Формирование внутренних повреждений в ПКМ при обработке

Чем больше момент на сверле, при равных диаметрах и параметрах обработки, тем выше внутренние повреждения. Такие повреждения могут существенно снизить прочностные характеристики изготовленной детали. Поэтому сравнительные измерения моментов сил резания становятся важным индикатором качества обработки.

Именно от правильно выбранного режущего инструмента и рациональной технологии обработки зависит отсутствие дефектов и высокие прочностные характеристики изготавливаемых деталей из ПКМ.

3.1 Разработка технологии размерной фрезерной обработки отформованных деталей из ПКМ с минимизацией повреждения кромок

В настоящем разделе диссертации представлены исследования влияния различных технологических режимов при проведении размерной фрезерной обработки и изготовления проемов отформованных деталей из ПКМ с

минимальными повреждениями кромок, в том числе и в исследовании влияния режимов фрезерования (скорости резания, осевой глубины резания, ширины резания и скорости подачи, а также направления фрезерования (попутное встречное)) и вида инструмента на качество обработанных кромок в углепластике.

Основной целью настоящей работы является сопоставление различного режущего инструмента для проведения фрезерования.

Для фрезерования углепластика использован инструмент:

- 1- фреза-роутер НАМ (D=8 мм) производство Россия;
- 2- фреза (Z=1, D=8 мм), специально изготовленная в г. Омск однозубая фреза с острой режущей кромкой;
- 3- фреза-роутер (керамика, D=6.35 мм);
- 4- фреза-роутер Iscar EPN-F10 06-19C06F57;
- 5- фреза-роутер KENNAMETAL CBDB1000AXBS;
- 6- фреза WOLF.

Фотоизображения всех фрез представлены на рисунке 3.2.



а) фреза (Омск, $Z=1$, $D=8$ мм)



б) фреза-роутер НАМ ($D=8$ мм)



в) фреза-роутер (керамика, $D=6.35$ мм)



г) фреза-роутер Iscar EPN-F10 06-19C06F57



д) фреза-роутер KENNAMETAL CBDB1000AXBS



е) фреза роутер WOLF

Рисунок 3.2 – Изображения использованных в эксперименте фрез

Режимы обработки.

Способ охлаждения и диапазон оборотов шпинделя при обработке деталей из ПКМ был выбран на основе анализа обработки тестового образца. В нем варьировались скорость вращения, подача, способы охлаждения зоны резания. Образец представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Сверление выполненное в НТЦ НПК ФГУП «ЦАГИ»

В процессе проведенного эксперимента установлено, что:

- значительное изменение частоты вращения инструмента не приводит к выраженному изменению качества отверстий. При изменении частоты вращения инструмента диаметром 6.0мм от 5000 до 18000 оборотов в минуту прочность образца с изготовленным отверстием повышается на 2%, что находится в пределах обычного разброса значений статической прочности углепластика;
- наилучшего качества обработки удалось добиться при воздушном охлаждении и скорости вращения шпинделя более 2000 об/мин (см. рисунок 3.3 строка «U» с отверстиями)

В проведенных экспериментах применялось охлаждение зоны обработки воздухом, режимы обработки представлены в таблицах 3.1- 3.4.

Фрезерование отверстий в пластине из углепластика производилось следующими режимами: выборка каждого отверстия проводилась послойно за два захода. Глубина фрезерования одного слоя 3 мм. В таблицах 3.3 и 3.4 представлены максимальные значения усилий резания для трех режимов со скоростями резания 100, 125 и 150 м/мин соответственно.

Таблица 3.1 – Указаны значения максимальных усилий (полная сила F), каждым инструментом обработка производилась 3 раза

| № | Операция | Инструмент | Подача, мм/об | Скорость вращения шпинделя, об/мин | F _{ср} , Н |
|---|--------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------------|
| 7 | фрезерование | фреза (Омск, Z=1, D=8 мм) | 255 | 4244 | 140 |
| 8 | фрезерование | фреза-роутер НАМ (D=8 мм) | 255 | 2122 | 140 |
| 9 | фрезерование | фреза-роутер (керамика, D=6.35 мм) | 255 | 2122 | 165 |

Таблица 3.2 – Фреза-роутер ISCAR EPN-F10 06-19C-6F57, D = 6мм

| № отверстия | Подача, мм/мин | Скорость вращения шпинделя, об/мин | Скорость резания, м/мин | F, Н | Ra |
|-------------|----------------|------------------------------------|-------------------------|------|-----|
| 1 | 796 | 5305 | 100 | 110 | 2.7 |
| 2 | 994,5 | 6631,5 | 125 | 130 | |
| 3 | 1193,5 | 7957,5 | 150 | 140 | |

Таблица 3.3 – Фреза KENNAMETAL CBDB1000AXBS

| № отверстия | Подача, мм/мин | Скорость вращения шпинделя, об/мин | Скорость резания, м/мин | F, Н | Ra |
|-------------|----------------|------------------------------------|-------------------------|------|-----|
| 1 | 796 | 3183 | 100 | 165 | 2.9 |
| 2 | 995 | 3979 | 125 | 177 | |
| 3 | 1193,5 | 4774,5 | 150 | 180 | |

Таблица 3.4 – Фреза WOLF

| № отверстия | Подача, мм/мин | Скорость вращения шпинделя, об/мин | Скорость резания, м/мин | F, Н | Ra |
|-------------|----------------|------------------------------------|-------------------------|------|-----|
| 1 | 800 | 3000 | 100 | | 2.2 |

3.1.1 Измерение усилий резания

Образец, установленный на специализированном комплексе оборудования для измерения усилий резания при фрезеровании на обрабатывающих центрах с ЧПУ, показан на рисунке 3.4. Пример циклограммы усилий резания по инструменту представлен на рисунке 3.5. Результаты измерений сил резания представлены в таблицах 3.1-3.4.



Рисунок 3.4 – Углепластиковая пластина, установленная на специализированном комплексе оборудования для измерения усилий резания при фрезеровании на обрабатывающих центрах с ЧПУ

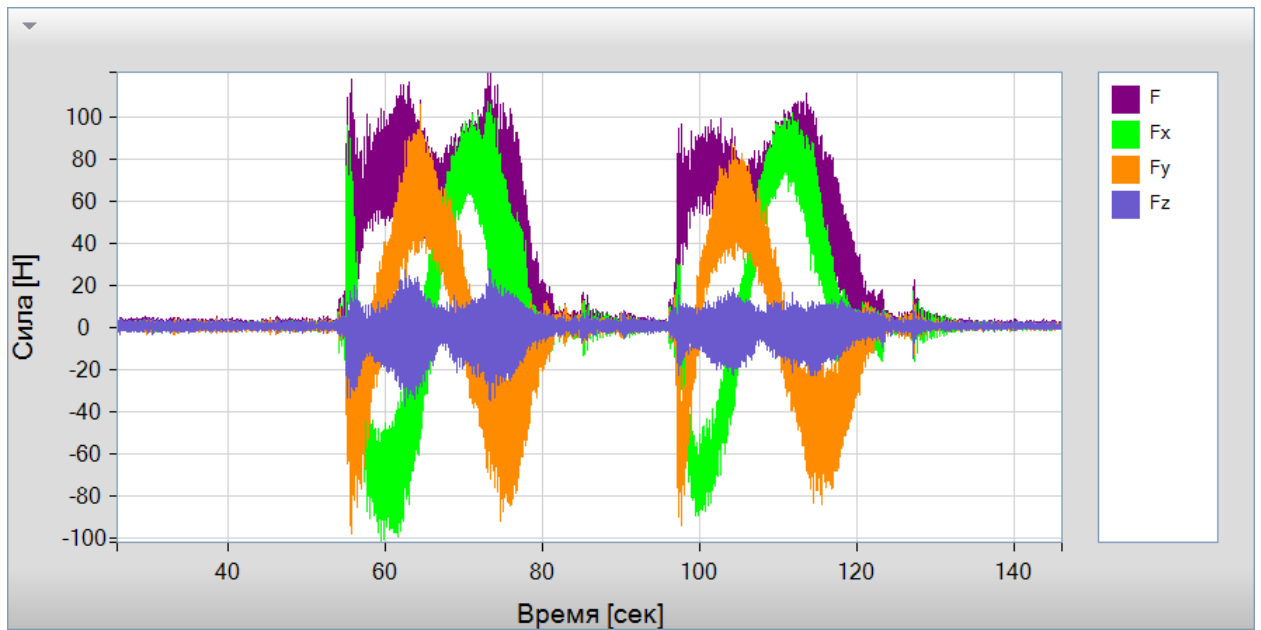


Рисунок 3.5 – Циклограмма усилий резания фрезой ISCAR EPN-F10 06-19C-6F57 (скорость резания 100 м/мин)

Микроскопические исследования качества поверхности отверстия и его кромки, при сверлении и фрезеровании

Для проведения исследования наносимых повреждений вследствие механической обработки использовалась углепластиковая пластина размером 270.0x270.0мм толщиной 6.0мм (рисунок 3.6), схема укладки представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Укладка и слои волокон для половины толщины листа

| Материал слоя | Стекло-пластик Hexply M21/37%/7781 | Углепластик Hexply M21/34%/UD194/IMA | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------------------|--------------------------------------|------|----|------|----|----|-----|----|----|---|------|----|------|----|----|
| | | № слоя | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Укладка | 0° | | ±45° | 0° | ±45° | 0° | 0° | 90° | 0° | 0° | | ±45° | | ±45° | | 0° |

Примечание: Обозначение $\pm 45^\circ$ для укладки введено для краткости – эти слои являются монослоями и для каждого из них укладка имеет однозначное наименование, т.е. $+45^\circ$; -45° и т.д. соответственно.

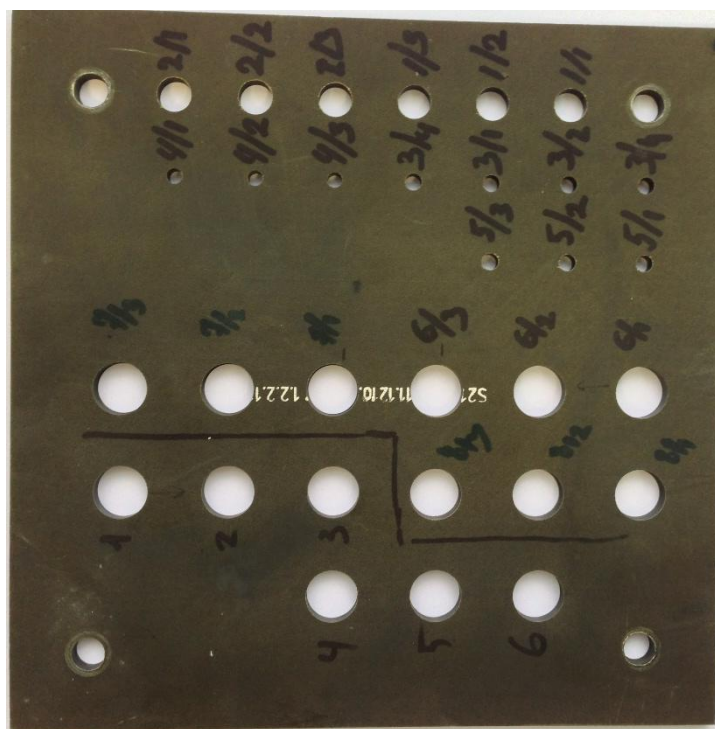


Рисунок 3.6 – Углепластиковая пластина с изготовленными отверстиями.

Микроскопическому исследованию подвергались отверстия в указанном образце как со стороны входа инструмента в образец, так и со стороны выхода инструмента из образца.

Измерение повреждений материала образцов вокруг отверстий показало, что при фрезеровании отверстий наименьшие повреждения наносит инструмент с наиболее заостренной режущей кромкой (фреза Омск, $Z=1$, $D=8$ мм, рисунок 3.2а). Повреждения на внешнем слое образца со стороны входа инструмента не более 0.1мм, на выходе не более 0.1мм. Однако размеры повреждений увеличиваются по мере достаточно быстрого притупления режущей кромки.

Сравнение повреждений при фрезеровании отверстий в пластине из углепластика фрезами: фреза-роутер Iscar EPN-F10 06-19C06F57 и фреза-роутер KENNAMETAL CBDB1000AXBS и WOLF с применением трех режимов со скоростями резания 100, 125 и 150 м/мин соответственно, показывает, что это не

приводит к существенным изменениям в размерах повреждений на обрабатываемых кромках.

3.1.2 Технологические рекомендации для проведения размерной фрезерной обработки отформованных деталей из ПКМ

В этапы обработки кромок целесообразно включить два прохода – черновой и чистовой.

Черновой проход фрезы- удаление основного объема материала, необходимо осуществлять на глубину не более 0.5 диаметра инструмента с целью снижения нагрузки на инструмент и для лучшего его охлаждения в процессе обработки, т.к. использование СОЖ при обработке углепластиковых образцов не целесообразно. В результате чернового прохода на обработанных кромках имеются небольшие борозды глубиной 0.1-0.3мм. Поэтому припуск на сторону кромки образцов нужно использовать не менее 0,5мм для последующей чистовой обработки. В качестве примера фрезы представлена концевая фреза фирмы Karnasch серии 29.1790 роутерного типа (рисунок 3.7).

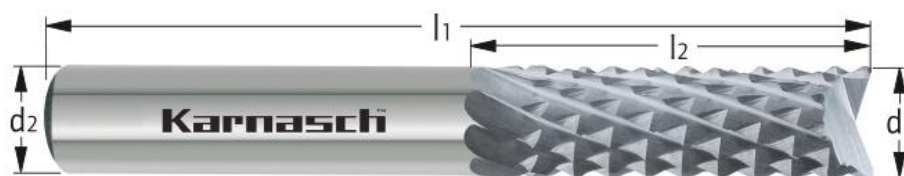


Рисунок 3.7 – Фреза роутерного типа для черновой обработки кромок

Концевая фреза имеет форму стержня, выполненного из высокотвердых и тугоплавких материалов. Специальная геометрия режущих кромок позволяет избежать вибраций в процессе резания, а также предотвращает расслоение материала. Обладает высокой износостойкостью фрез по сравнению с обычными сталями.

Окончательный чистовой проход осуществляется за один слой, равный толщине детали, при этом снимается остаточный припуск 0,5мм и обеспечивался номинальный размер с заданной точностью.

В качестве примера фрезы для чистового прохода представлена концевая фреза фирмы Karnasch серии 29.0305 с ленточной режущей кромкой (рисунок 3.8).

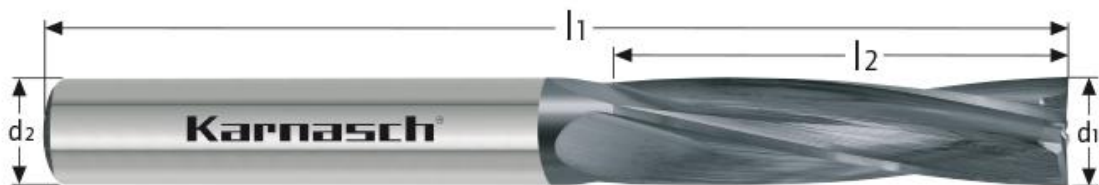


Рисунок 3.8 – Фреза для чистовой обработки кромок

Концевая фреза с ленточной кромкой с четырьмя зубьями с углом спирали 10град. предназначена для обработки пазов и финишного бокового фрезерования. Фреза имеет нанокристаллическое алмазное покрытие, которое повышает срок службы в 5-6 раз по сравнению с инструментами без покрытия. Основное достоинство обработки этим инструментом это то , что практически исключается дополнительная ручная обработка, т.к. обеспечивается заданная точность и чистота поверхности.

В качестве альтернативного технологического процесса для ускорения и снижения трудоемкости при проведении размерной фрезерной обработки деталей из ПКМ возможно применения новейшего инструмента, включающего в себя зубцы для черновой и чистовой обработки. В нем основной объем материала снимают зубья с геометрией, предназначенной для черновой обработки, затем зубья, обладающие повышенной остротой режущей кромки, снимают на небольшую глубину (чуть превышающую борозды, оставленные черновым зубом фрезы), позволяя получить за один проход поверхность высокого качества. На сегодняшний момент такой

инструмент представлен только одним производителем инструмента фирмой Karnasch (Германия). На рисунках 3.9-3.11 представлено изображение такого инструмента на фоне фрезы с традиционной геометрией для проведения чистовой обработки.



Рисунок 3.9 – Инструмент ф. Karnasch, включающий зубцы для черновой и чистовой обработки



Рисунок 3.11 – Инструмент ф. Karnasch, сверху традиционная фреза для чистовой обработки, снизу инновационная фреза для одновременной черновой и чистовой обработки

3.2 Разработка технологии изготовления проемов отформованных деталей из ПКМ с минимизацией повреждения кромок

Для исследования влияния основных технологических параметров механической лезвийной обработки карманов или проемов в деталях из ПКМ на масштаб повреждений на обработанных кромках, возникающие силы резания и температуру в зоне обработки предложены и проведены следующие экспериментальные исследования:

План эксперимента по оценке сил резания и масштабов повреждений на поверхности в результате механической обработки элемента конструкции типа карман в образцах из ПКМ

Оборудование и инструмент

Станок: обрабатывающий центр с ЧПУ ARES 3618 PX5

Инструмент- концевая фреза по углепластику D6R0, z=4 (ф. Karnasch)

Измерительная платформа с пьезоэлектрическими динамометрами, профилометр для измерения шероховатости и инфракрасная камера Flir 7700.

Образцы: Углепластиковые панели с направлением волокон +/-0/45/90

Измеряемые параметры

Силы резания вдоль осей FX, FY, FZ, масштаб повреждений на обработанных кромках, температура в зоне обработки T⁰C,.

Параметры обработки:

Обрабатываемый элемент- круглый карман D=20мм

Глубина резания: 1мм, 2.5мм, 5мм

Ширина резания: 2 мм, 4мм

Подача: 100мм/мин, 350мм/мин, 800мм/мин

Обороты шпинделя: 3000 об/мин

Направление резания- попутное или встречное из центра к периферии.

Общее количество карманов 44.

Для оценки повреждаемости в зависимости от направления укладки волокон наполнителя фрезерование производилось по специальным спиральным траекториям (Рис. 3.12).

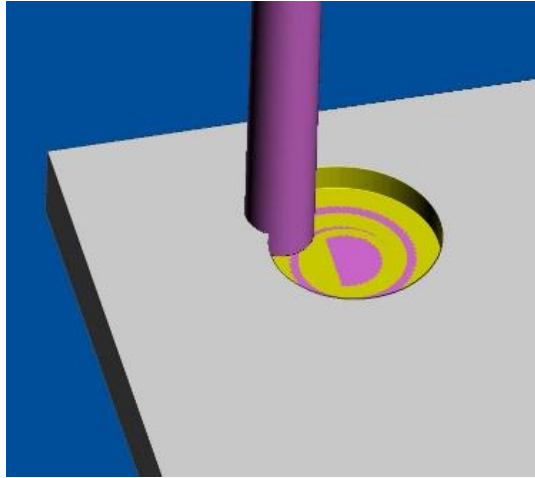


Рисунок 3.12 – Спиральная траектория движения инструмента при обработке карманов

Специализированный комплекс оборудования для измерения усилий резания при фрезеровании на обрабатывающих центрах с ЧПУ и исследуемый образец из ПКМ, установленные при проведении эксперимента в рабочей зоне станка с ЧПУ, показаны на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 – Кварцевый многокомпонентный динамометр тип 9257BA с опытным образцом

Типовая циклограмма усилий резания представлена на рисунке 3.14. В процессе обработки карманов проводился замер трех составляющих сил резания – по осям X, Y и Z (синий, красный и розовый цвета соответственно).

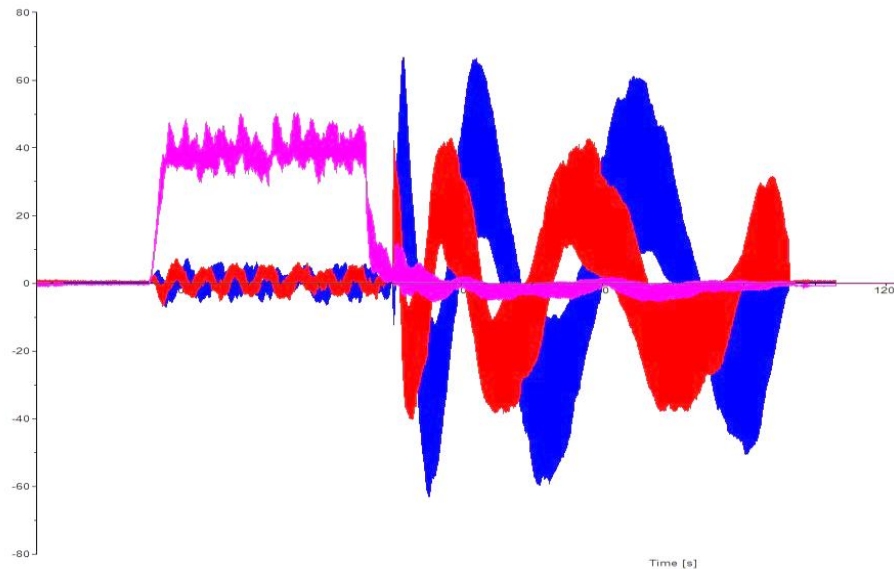


Рисунок 3.14 – общий вид усилий одного из экспериментов

На представленной циклограмме отчетливо видно, что усилия по осям X и Y (синий и красный цвета соответственно) отличаются. Это можно объяснить особенностью структуры материала испытываемой композитной пластины. В момент врезания фрезы в пластину большое усилие происходит по вертикальной оси Z (розовый цвет). В дальнейшем вертикальная составляющая усилия минимальна по сравнению с усилиями в других плоскостях, в том числе за счет небольшого угла спирали.

В таблице 3.6 приведены сводные данные со всех 44 экспериментов, проведенных с использованием измерительного оборудования Kistler и ЧПУ CMS ARES. На основании полученных значений можно сделать заключение о зависимостях возникновения усилий в каждой из 3х плоскостей (X, Y, Z) при изменении параметров режима обработки испытываемого материала, таких как: ширина резания, скорость подачи режущего инструмента, глубина резания, количество оборотов в минуту фрезы, а также направление фрезерования. Зависимости усилий при фрезеровании от основных технологических параметров представлены на соответствующих диаграммах, рисунок 3.15.

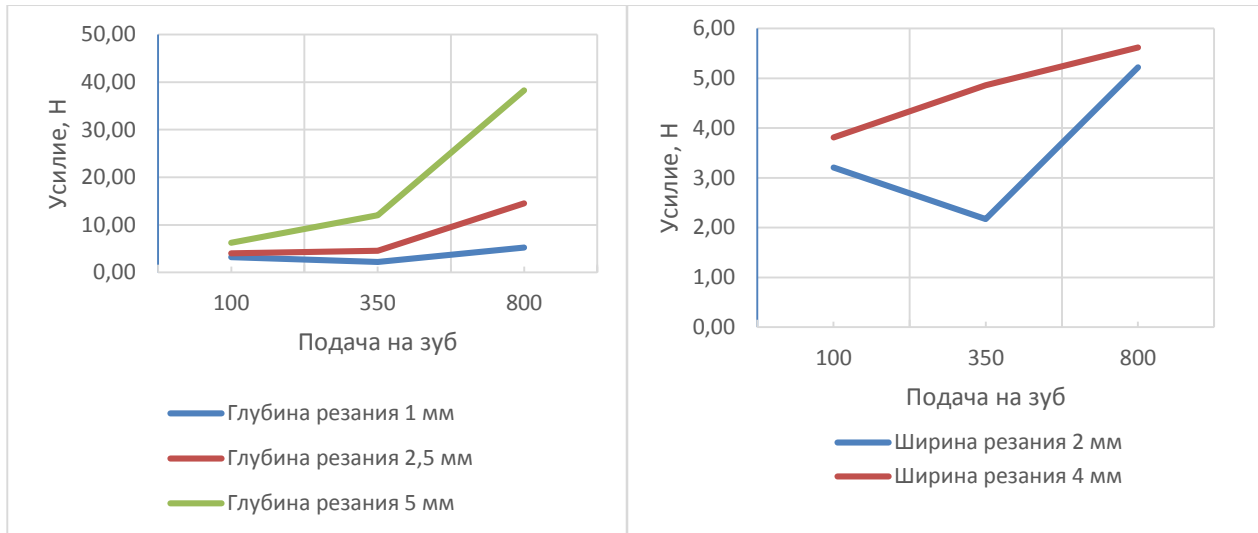
При анализе необходимо учесть, что динамометрическая платформа и АЦП не обладают идеальными точностными характеристиками и вносят погрешность в полученные результаты. Таким образом, в случаях противоречия

экспериментальных данных с теорией, необходимо провести серию новых замеров для исключения случайных погрешностей.

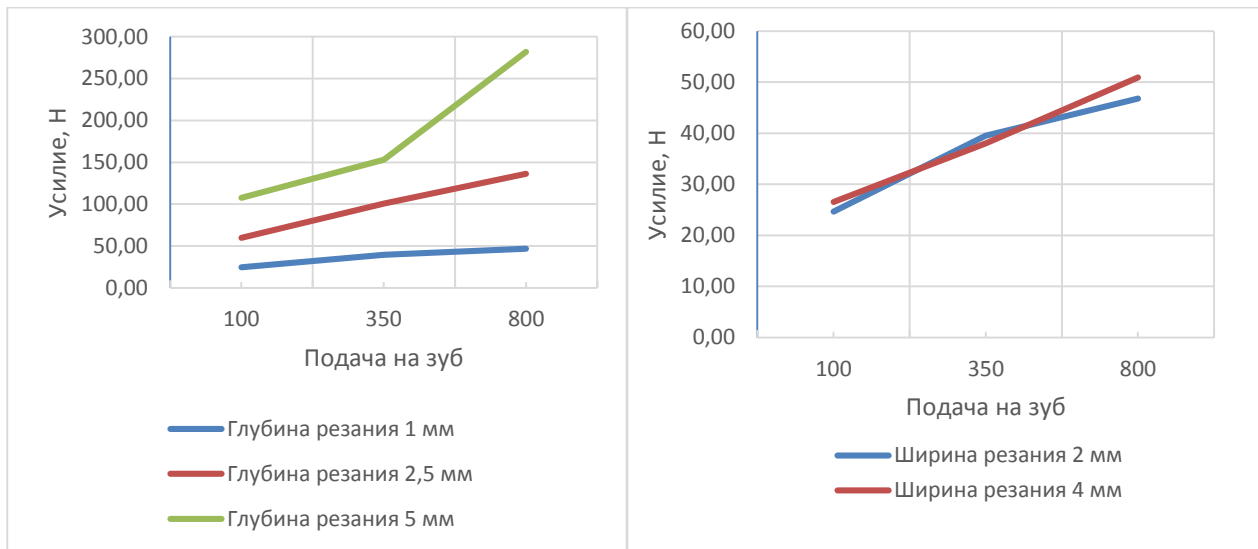
Ниже представлены диаграммы зависимости силы резания, возникающей при проведении выборки несквозных карманов, от каждого из изменяемых технологических параметров обработки. Чтобы избежать влияние износа режущей кромки во время проведения эксперимента постоянно проводилась замена режущего инструмента на новый без износа.

Таблица 3.6 – Условия и результаты экспериментов.

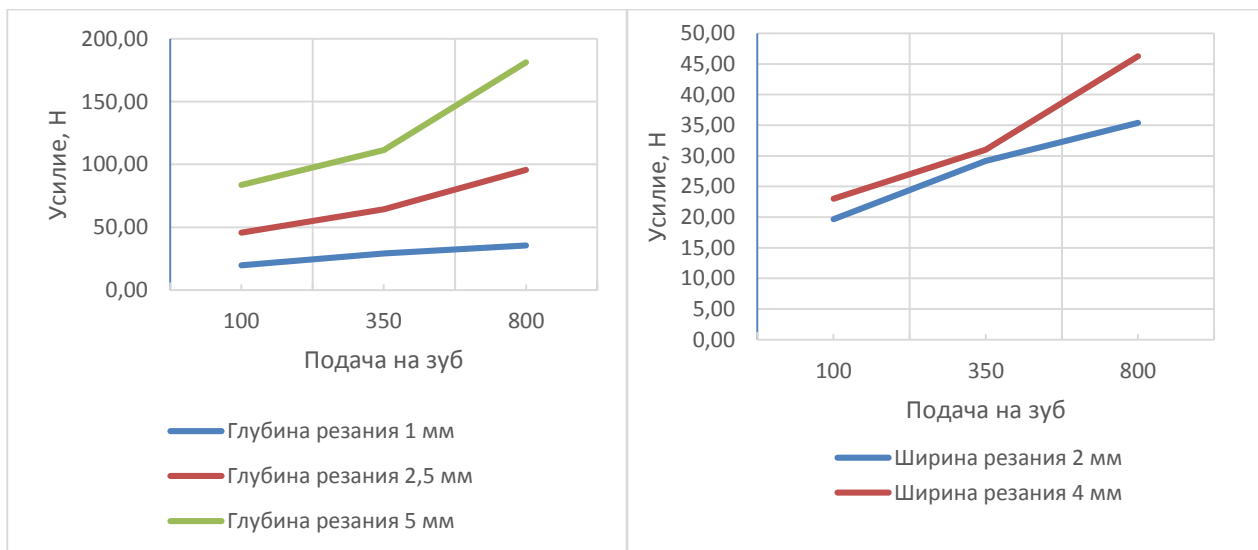
| № Кармана | Тип обработки попутное/ встречное | Глубина резания | Ширина резания | Подача на зуб | F _x , Н | F _y , Н | F _z , Н |
|--------------|---|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Обороты 3000 | | | | | | | |
| 1 | п | 1 | 2 | 100 | 24,69 | 19,68 | 3,21 |
| 2 | в | 1 | 2 | 100 | 28,86 | 22,06 | 3,24 |
| 3 | п | 1 | 4 | 100 | 26,57 | 23,01 | 3,81 |
| 4 | в | 1 | 4 | 100 | 27,83 | 28,93 | 3,82 |
| 5 | п | 1 | 2 | 350 | 39,54 | 29,17 | 2,17 |
| 6 | в | 1 | 2 | 350 | 39,83 | 30,11 | 2,06 |
| 7 | п | 1 | 4 | 350 | 38,00 | 31,01 | 4,86 |
| 8 | в | 1 | 4 | 350 | 37,32 | 33,48 | 4,52 |
| 9 | п | 1 | 2 | 800 | 46,81 | 35,41 | 5,22 |
| 10 | в | 1 | 2 | 800 | 47,45 | 36,63 | 4,77 |
| 11 | п | 1 | 4 | 800 | 50,93 | 46,26 | 5,62 |
| 12 | в | 1 | 4 | 800 | 51,60 | 39,06 | 4,35 |
| 13 | п | 2,5 | 2 | 100 | 59,76 | 45,81 | 4,02 |
| 14 | в | 2,5 | 2 | 100 | 60,24 | 46,13 | 3,55 |
| 15 | п | 2,5 | 4 | 800 | 124,00 | 95,57 | 17,51 |
| 16 | в | 2,5 | 4 | 800 | 117,7 | 89,25 | 18,17 |
| 17 | п | 5 | 2 | 100 | 107,58 | 83,62 | 6,25 |
| 18 | в | 5 | 2 | 100 | 115,4 | 90,11 | 7,42 |
| 19 | п | 5 | 4 | 100 | 116,6 | 94,95 | 6,99 |
| 20 | в | 5 | 4 | 100 | 110,9 | 90,79 | 6,42 |
| 21 | п | 5 | 2 | 350 | 153,1 | 111,5 | 12,01 |
| 22 | в | 5 | 2 | 350 | 159,9 | 110,08 | 13,66 |
| 23 | п | 5 | 4 | 350 | 174,34 | 133,18 | 15,53 |
| 24 | в | 5 | 4 | 350 | 169,8 | 124,64 | 14,98 |
| 25 | п | 5 | 4 | 800 | 242,51 | 199,47 | 30,69 |
| 26 | в | 5 | 4 | 800 | 242,23 | 174,62 | 35,15 |
| 27 | п | 2,5 | 4 | 100 | 64,88 | 43,33 | 4,56 |
| 28 | в | 2,5 | 4 | 100 | 65,89 | 53,21 | 3,54 |
| 29 | п | 2,5 | 2 | 350 | 100,8 | 64,38 | 8,02 |
| 30 | в | 2,5 | 2 | 350 | 97,88 | 64,73 | 9,09 |
| 31 | п | 2,5 | 4 | 350 | 96,05 | 68,91 | 9,76 |
| 32 | в | 2,5 | 4 | 350 | 91,55 | 64,73 | 10,5 |
| 33 | п | 2,5 | 2 | 800 | 136,19 | 95,71 | 14,54 |
| 34 | в | 2,5 | 2 | 800 | 139,9 | 88,88 | 15,6 |
| 35 | п | 5 | 2 | 800 | 282,07 | 181,29 | 38,26 |
| 36 | в | 5 | 2 | 800 | 265,5 | 177,76 | 33,95 |
| Обороты 6000 | | | | | | | |
| 37 | п | 2,5 | 2 | 350 | 68,83 | 44,5 | 4,23 |
| 38 | в | 2,5 | 2 | 350 | 72,08 | 47,47 | 4,09 |
| 39 | п | 2,5 | 4 | 350 | 70,51 | 51,26 | 5,69 |
| 40 | в | 2,5 | 4 | 350 | 76,27 | 51,79 | 4,62 |
| 41 | п | 5 | 2 | 800 | 163,2 | 111,17 | 17,91 |
| 42 | в | 5 | 2 | 800 | 151,7 | 110,11 | 13,38 |
| 43 | п | 5 | 4 | 800 | 186,02 | 129,73 | 19,21 |
| 44 | в | 5 | 4 | 800 | 171,7 | 128,33 | 17,89 |



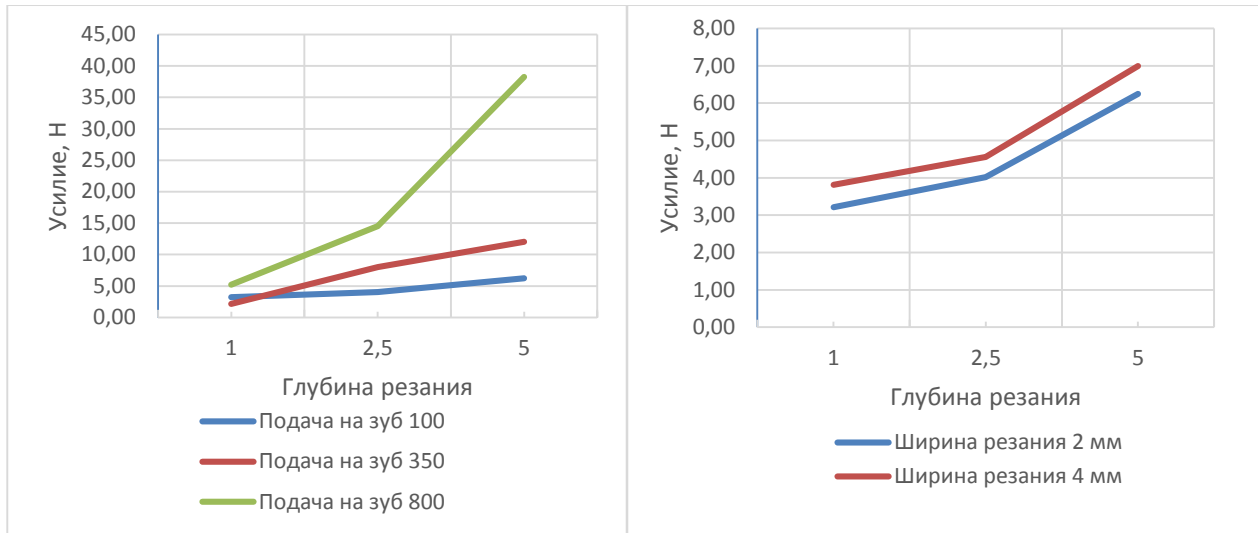
А) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от подачи на зуб



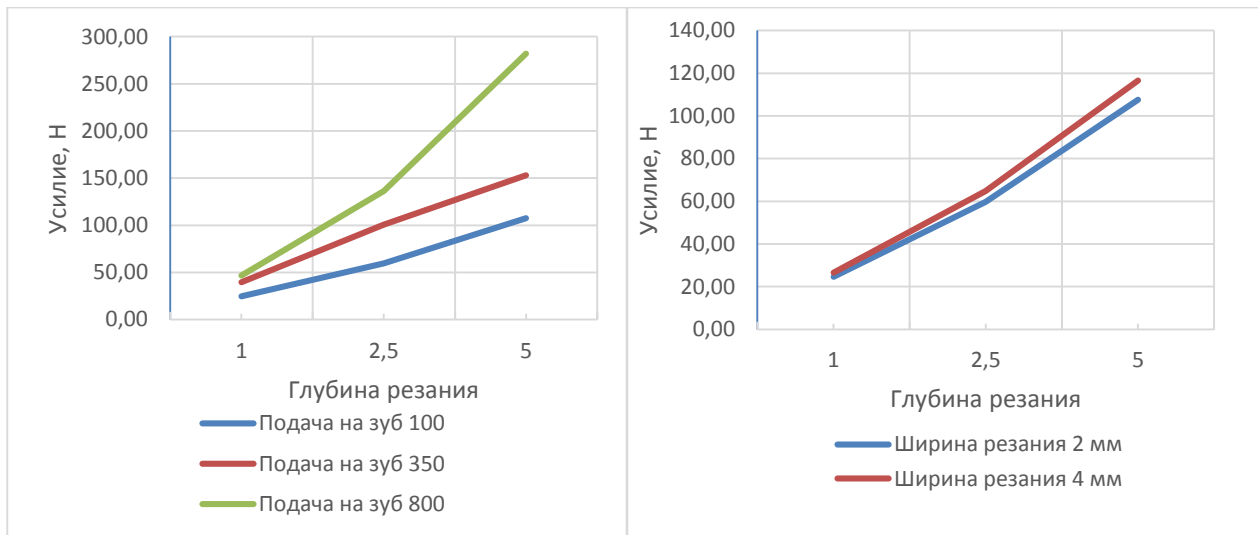
Б) Диаграммы зависимости усилий по оси X от подачи на зуб



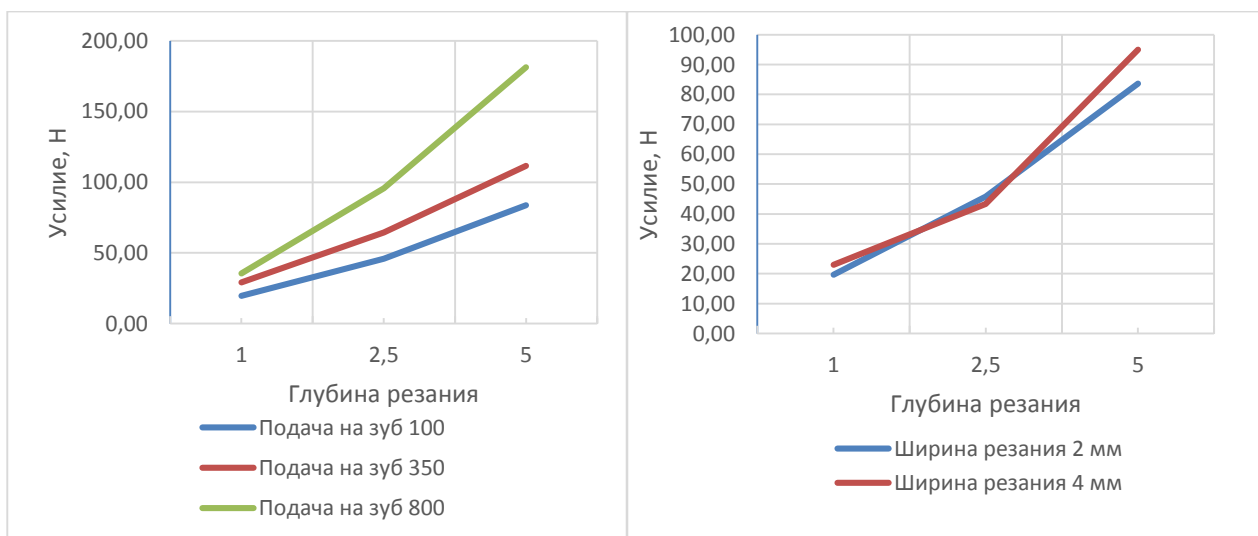
В) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от подачи на зуб



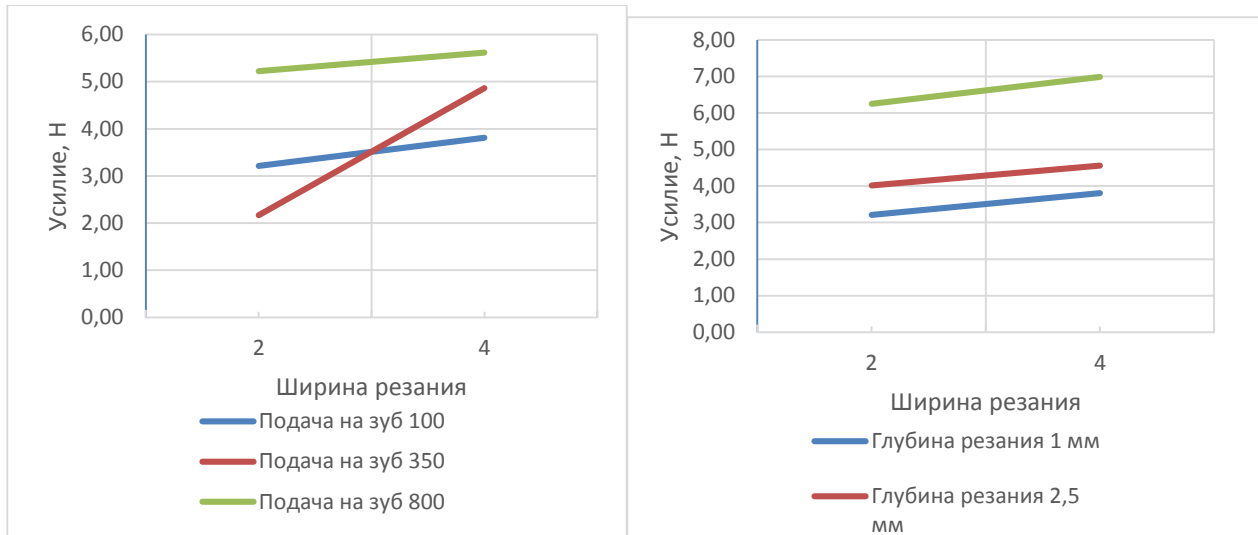
Г) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от глубины резания



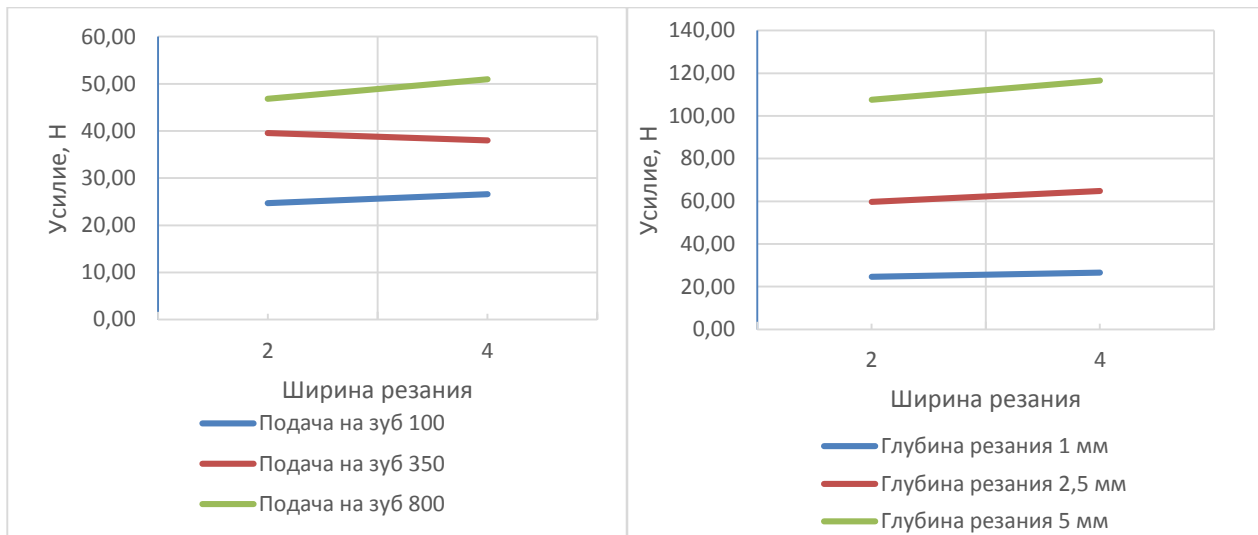
Д) Диаграммы зависимости усилий по оси X от глубины резания



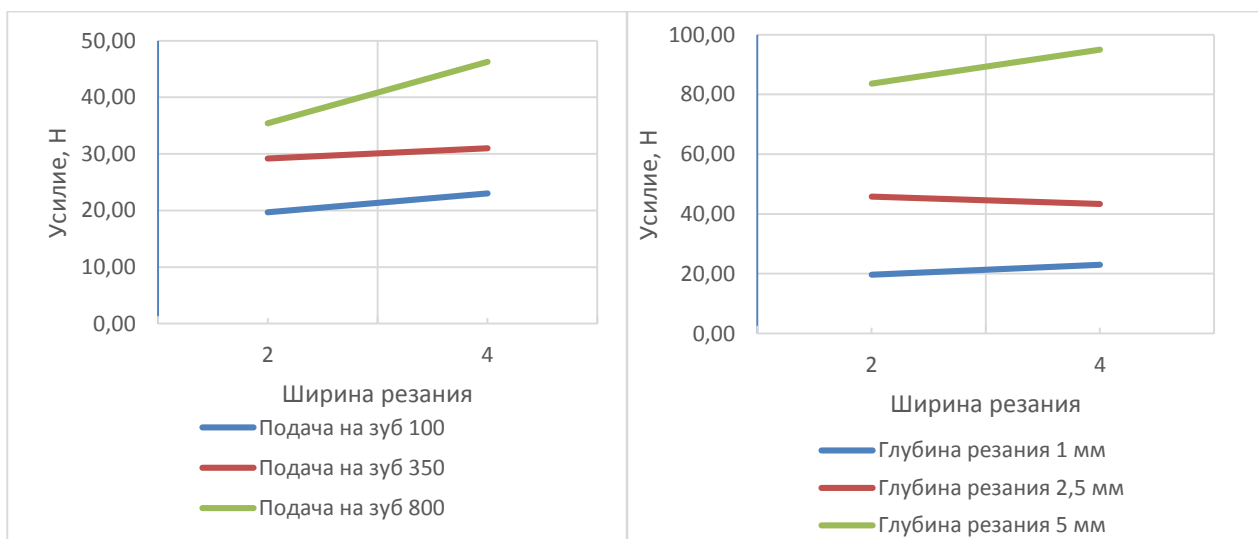
Е) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от глубины резания



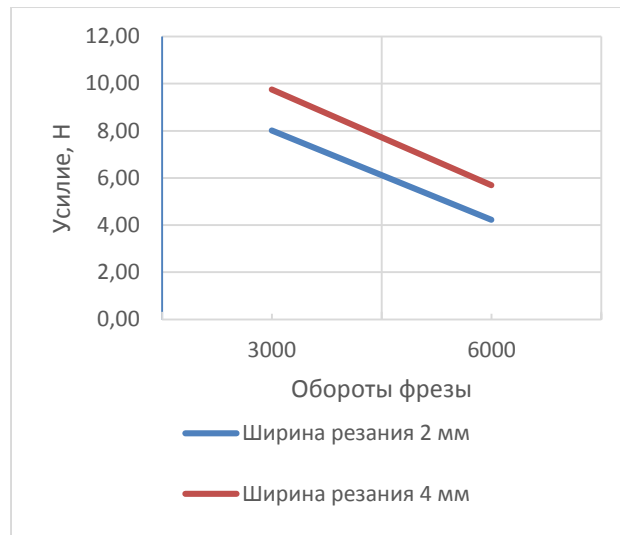
Ж) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от ширины резания



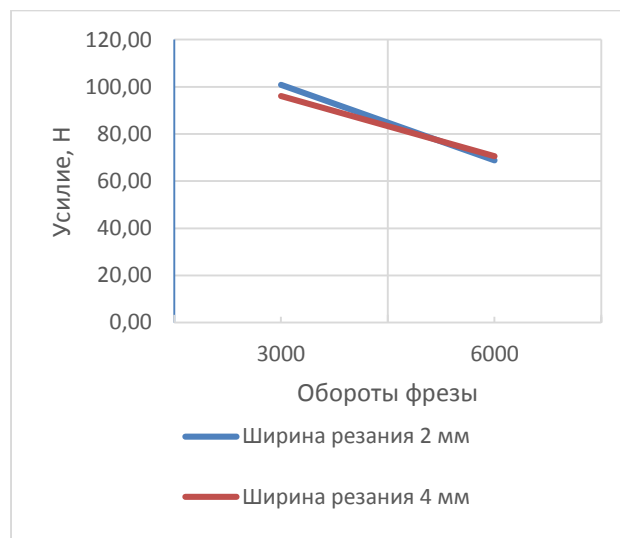
З) Диаграммы зависимости усилий по оси X от ширины резания



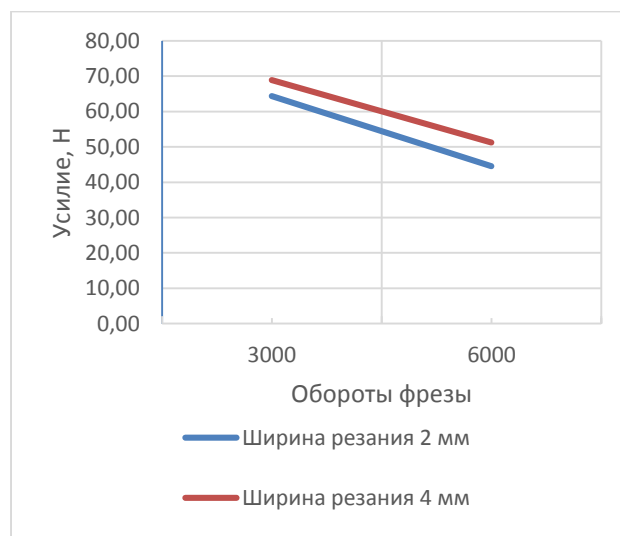
И) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от ширины резания



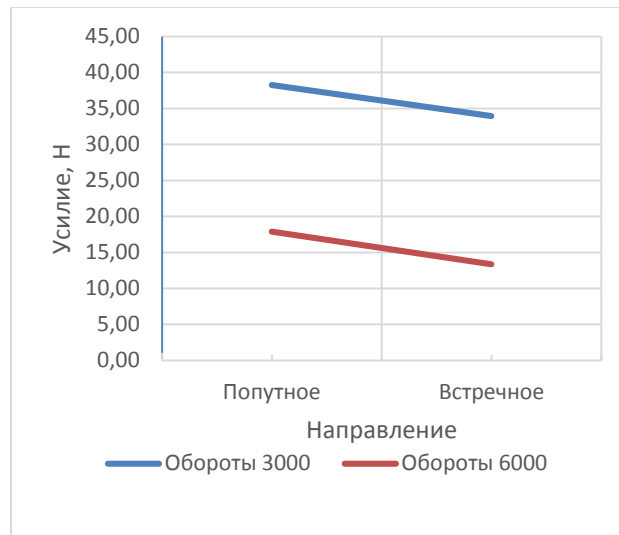
К) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от оборотов фрезы



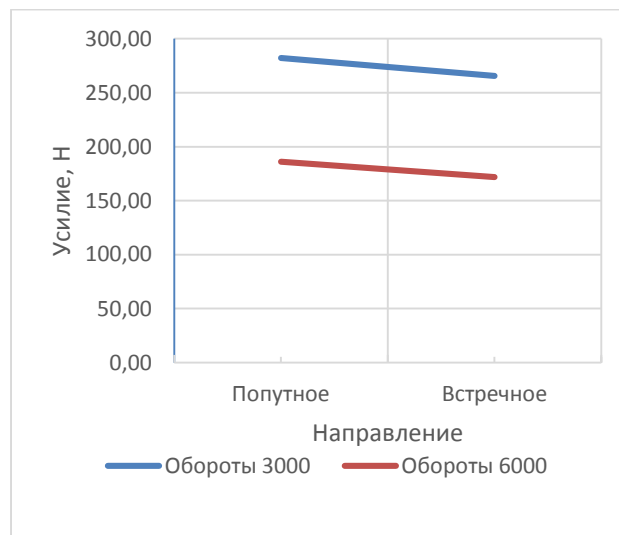
Л) Диаграммы зависимости усилий по оси X от оборотов фрезы



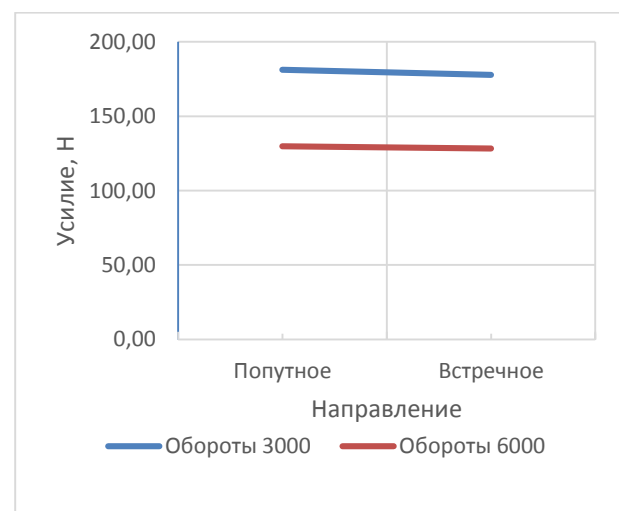
М) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от оборотов фрезы



Н) Диаграммы зависимости усилий по оси Z от направления фрезерования



О) Диаграммы зависимости усилий по оси X от направления фрезерования



П) Диаграммы зависимости усилий по оси Y от направления фрезерования

Рисунок 3.15 – Диаграммы зависимости силы резания от каждого из изменяемых технологических параметров обработки

Анализ усилий в зависимости от направления фрезерования

Результаты измерения сил резания в зависимости от направления фрезерования встречного или попутного представлены на рисунках 3.15 Н-О-П.

Как видно из графиков выигрыш в уменьшении усилий от выбора встречного или попутного режима составляет в среднем 10-12%. Следовательно, при выборе режима обработки материала следует использовать встречное фрезерование.

Анализ усилий в зависимости от ширины резания

Результаты измерения сил резания в зависимости от ширины фрезерования представлены на рисунках 3.15 Ж-З-И.

Полученные результаты показывают, что на обрабатываемом образце из углепластиковой панели с направлением волокон $+0/45/90$ изменение ширины резания практически не влияет на изменение силового воздействия обрабатывающим инструментом.

Анализ усилий в зависимости от глубины резания

Результаты измерения сил резания в зависимости от глубины фрезерования представлены на рисунках 3.15 Г-Д-Е.

Как и предполагалось, изменение глубины резания очень сильно влияет на усилия, передаваемые режущим инструментом на обрабатываемую деталь. Наблюдается прямопропорциональная зависимость возникающих сил в различных плоскостях от глубины обработки поверхности. Однако стоит отметить, что данная зависимость не всегда работает. На графиках (рисунки 3.15 Г-Д-Е) можно заметить выбросы/падения (эксперименты 28, 20, 15, 25, 33, 35), которые выделяются из общей картины испытаний. Эти явления можно объяснить неточностью измерительной платформы, плохим креплением обрабатываемой поверхности, вибрациями управляющих систем станка с ЧПУ ARES, которые передаются через жесткое крепление на измерительные элементы динамометрической платформы. При увеличении глубины обработки усилия начинают очень сильно изменяться в зависимости от заданного режима.

Для выбора оптимальных режимов обработки детали следует учесть влияние выбора глубины обработки детали на усилия, воздействующие на деталь, так как

превышение этого параметра может значительно повлиять на качество обработки детали и срок службы фрез.

Вертикальная составляющая силы резания напрямую влияет на зону расслоения внешних слоев наполнителя. Для повышения производительности обработки целесообразно увеличивать ширину фрезерования, которая в меньшей степени влияет на вертикальную составляющую силы резания.

Анализ усилий в зависимости от подачи на зуб.

Результаты измерения сил резания в зависимости от подачи на зуб при фрезерования представлены на рисунках 3.15 А-Б-В.

Проанализировав полученные данные можно увидеть как сильно влияет скорость подачи на зуб на прикладываемые усилия инструмента к обрабатываемой поверхности. Влияние подачи существенное, но не такое значительное как при увеличении глубины обработки детали. При увеличении скорости подачи наблюдается непрямая зависимость приращения силы. Таким образом, увеличение скорости подачи предпочтительнее увеличения глубины с точки зрения приложенных сил на обрабатываемую деталь и производительности обработки. Усредняя полученные результаты, можно сделать вывод, что увеличение скорости подачи в 8 раз приводит к увеличению усилий в 2 раза.

Анализ усилий в зависимости от оборотов фрезы.

Результаты измерения сил резания в зависимости от частоты вращения фрезы представлены на рисунках 3.15 К-Л-М.

На диаграммах видно, что увеличение частоты вращения фрезы приводит к незначительному снижению усилий резания в плоскости обработки. Наибольшее влияние частота вращения фрезы имеет на вертикальную составляющую силы резания. Предположительно увеличение количества оборотов в 2 раз приводит к уменьшению усилий в $\sqrt{2}$ раз по осям X и Y, и по оси Z в 2 раз.

3.2.1 Измерение температуры в зоне обработки

Превышение температуры стеклования связующего в зоне резания при фрезеровании может привести к его охрупчиванию и, как следствие, снизить прочностные характеристики изготовленной детали. Поэтому контроль температуры в зоне резания является необходимым при разработке рекомендаций для проведения обработки высоконагруженных деталей из ПКМ.

Лабораторные измерения температур в зоне механической обработки образцов из ПКМ проводились с помощью ИК камеры FLIR SC325 (рисунок 3.16), функционирующий в длинноволновом поддиапазоне длин волн (8÷14 мкм) и позволяющий при съемке получать поля яркости.



Рисунок 3.16 – Тепловизор FLIR SC325

Полученные экспериментальные данные обрабатывались в типовом интерфейсе ПО ThermaCAM Researcher Pro, в результате поля яркости излучения преобразовывались в термограммы.

Методика эксперимента.

Задачей эксперимента с использованием тепловизора заключалась в определении температуры в зоне обработки детали из ПКМ и выделяемой раздробленной и содержащей пыль стружке, образующейся при механической обработке отверстия.

Тепловизионной съемке подвергался ряд карманов, отличающихся технологическими параметрами резания - ширина резания, скорость подачи режущего инструмента, глубина. Тепловизор, установленный в рабочей зоне станка с ЧПУ, показан на рисунке 3.17.



Рисунок 3.17 – Тепловизор установленный в рабочей зоне станка с ЧПУ

Карманы формировались в процессе обработки образца материала за счет обработки режущим лезвийным инструментом. Съемка осуществлялась в реальном масштабе времени с частотой 60 Гц. С использованием типового интерфейса определялись температурные поля каждого кармана. Полученные термограммы в дальнейшем использовались для оценки влияния на них изменения технологических параметров механической обработки неполых карманов в деталях из ПКМ.

Результаты эксперимента

Типовая термограмма и распределение температур обрабатываемого участка одного из карманов №34, особенностью которого является наибольшая, применяемая в эксперименте подача на зуб и средние значения ширины и глубины фрезерования, представлена на рисунке 3.18. Обращает внимание, что максимальная температура находится в точке, совпадающей с осью отверстия. При этом близлежащее к оси светящееся пространство обусловлено излучением пылевой стружки, образующейся при механической обработке отверстия.

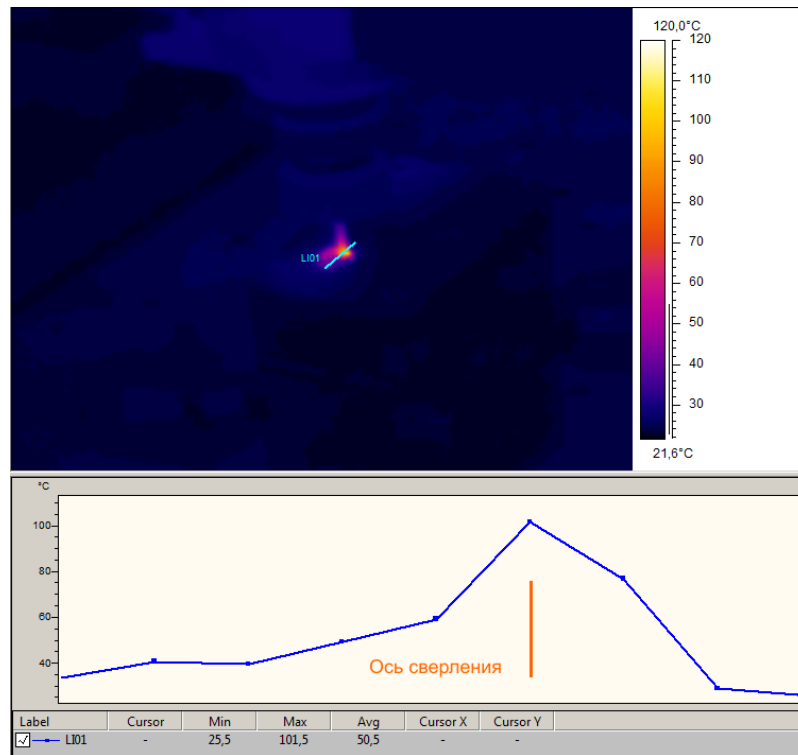


Рисунок 3.18 – Термограмма и кармана №34

На рисунке 3.19 представлена аналогичная информация относительно кармана №40. Отличие от выше рассмотренного кармана заключается в величине максимальной температуры, что обусловлено увеличенными в 2 раза оборотами.

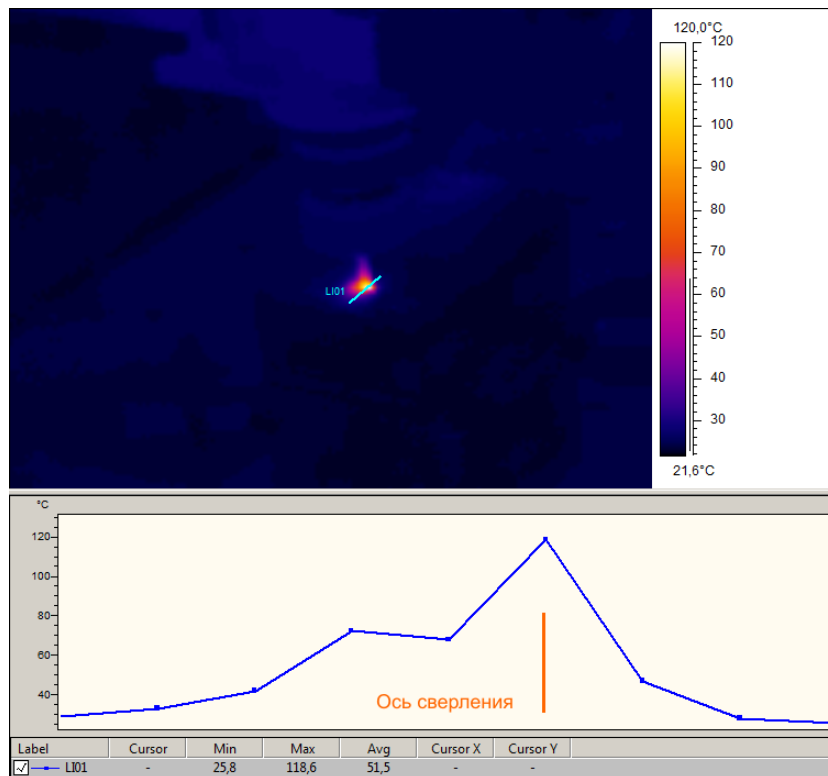


Рисунок 3.19 – Термограмма кармана №40

Результаты измерений остальных карманов представлены в таблице 3.7 и на рисунке 3.20.

Таблица 3.7 – Значения измеренных температур в зоне обработки

| № кармана | Максимальная температура, °С |
|-----------|------------------------------|
| 27 | 108 |
| 28 | 88 |
| 29 | 84 |
| 30 | 93 |
| 31 | 102 |
| 32 | 140 |
| 33 | 87 |
| 34 | 101 |
| 35 | 127 |
| 36 | 120 |
| 37 | 81 |
| 38 | 90 |
| 39 | 96 |
| 40 | 118 |
| 41 | 135 |
| 42 | 132 |
| 43 | 140 |
| 44 | 143 |

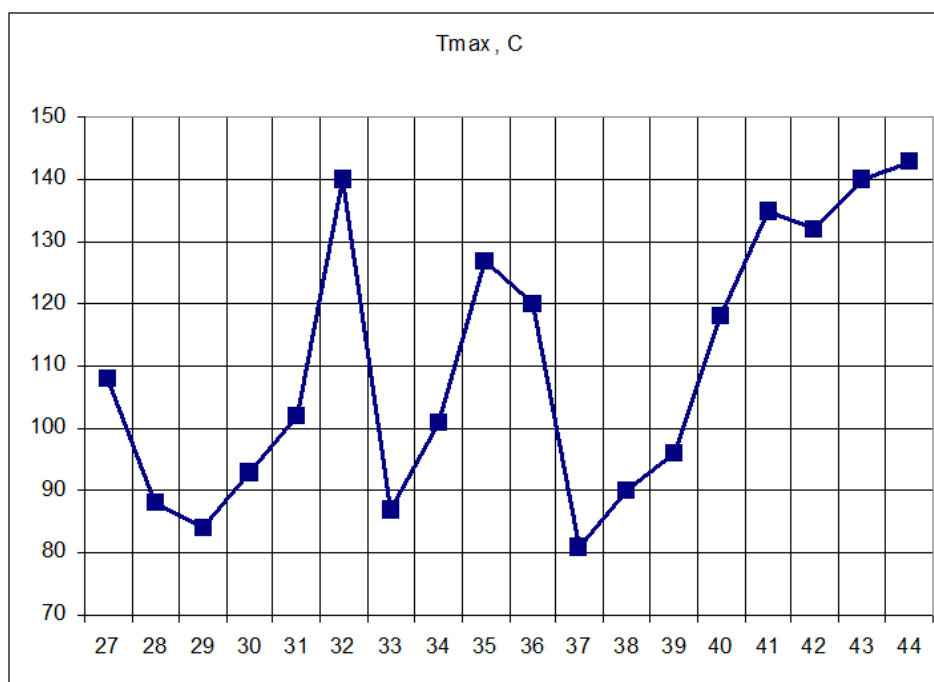


Рисунок 3.20 – Диаграмма максимальных значений температур для карманов №№

Анализ результатов измерений показал, что разброс значений температур находится в диапазоне 80-140 °С. Большим значениям соответствуют карманы №№ 32, 41-44, а малым значениям карманы №№ 37, 29, 28. При выборе технологических параметров обработки стоит учитывать, что тепловизор позволяет получить картину распределения температур снаружи на поверхности инструмента и обрабатываемой детали. Непосредственно в зоне обработки, с учетом низкой теплопроводности углепластика, температура может быть незначительно выше на 10-15°С. В связи с этим используемые при обработке карманов №№ 32, 41-44 технологические параметры приводят к повышению температуры в зоне обработки ~160°С, что не допустимо для ряда связующих. Эксперименты 41-44 соответствуют обработке при повышенной частоте вращения фрезы 6000 об/мин. Эксперимент №32 соответствует средним значения глубины и подачи при частоте вращения фрезы 3000 об/мин. Предположительно, определенная высокая температура в зоне обработки связана с ошибкой при анализе данных, полученных с тепловизора. Наибольшее влияние на температуру в зоне обработки осуществляет глубина фрезерования и частота вращения фрезы. При разработке технологических параметров фрезерования для достижения максимальной производительности стоит повышать в первую очередь ширину фрезерования и подачу.

3.2.2 Микроскопические исследования качества поверхности обработанных кромок

Для проведения микроскопических исследований структуры ПКМ на образцах, полученных при фрезеровании ряда цилиндрических карманов в ПКМ с изменением основных технологических параметров обработки со стороны входа режущего инструмента на наличие внешних дефектов на обрабатываемых кромках в виде сколов и трещин, применялся оптический микроскоп “Olimpus SZX10” (рисунок 3.21). Увеличение до 200х.



Рисунок 3.21 – Оптический микроскоп Olimpus SZX10 с установленным образцом для микроскопии

Микроскопии подвергались все обработанные карманы. Исследовались боковые кромки на наличие повреждений в виде вырывов волокон и сколов связующего. Результаты в виде изображений, полученных с применением микроскопа, представлены на рисунках 3.22. При оценке масштабов повреждений на обработанных кромках и поверхностях установлено, что на них не оказывают существенное влияние такие технологические параметры обработки как ширина, глубина фрезерования, а также подача и частота вращения инструмента. Основным параметром, влияющим на размеры повреждений в виде сколов и вырывов волокон наполнителя, является направление фрезерования. Как правило, лучшее качество обработки дает встречное фрезерование. Представлены изображения 2 пар отверстий, соответствующие попутному и встречному фрезерованию.

Анализ изображений показал, что в результате механической выборки карманов в пластине из ПКМ повреждения на обработанных кромках со стороны входа инструмента незначительные и их размер не зависит от применяемых технологических параметров обработки. При изучении обработанных боковых поверхностей обнаружены характерные вырывы волокон наполнителя из полимерной матрицы. Площадь области с такими повреждениями зависит от

применяемого направления фрезерования. При применении встречного фрезерования зона с повреждениями на обработанных поверхностях заметно меньше. По визуальной оценке применение встречного фрезерования уменьшает площадь области с дефектами и их глубину не менее чем на 20-30% по сравнению с попутным фрезерованием.

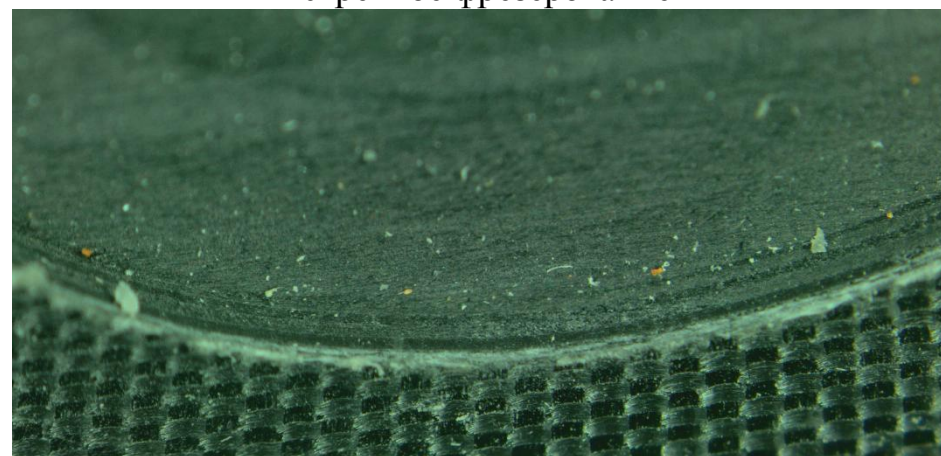
Для уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности необходимо применять встречное фрезерование.

Попутное фрезерование



карман №9

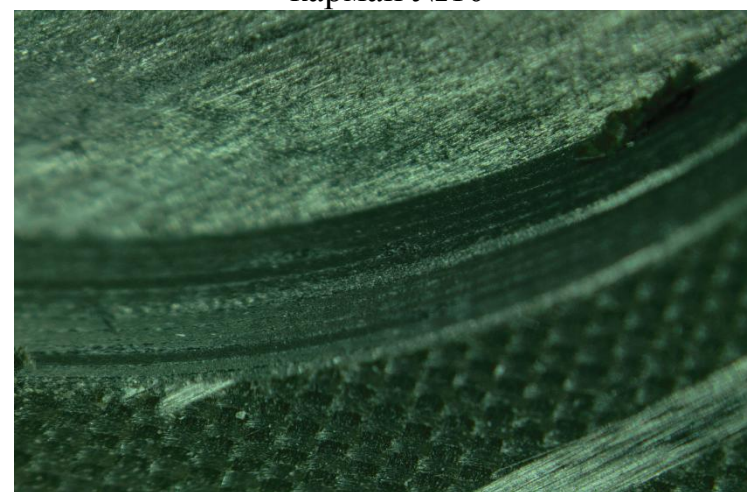
Встречное фрезерование



карман №10



карман №33



карман №34

Рисунок 3.22 Фотоизображения обработанных фрезерованием боковых поверхностей образцов

3.2.3 Технологические рекомендации для проведения фрезерования полостей и карманов в деталях из ПКМ

Приведенные выше материалы исследований и экспериментальная обработка деталей из ПКМ, а также анализ ее результатов, создают основу для разработки рекомендаций фрезерования полостей и карманов в деталях из ПКМ.

Анализ состояния кромок деталей из ПКМ после механической обработки показывает, что основным нарушением их целостности становятся растрескивание связующего и вытягивание волокон наполнителя. Базовой рекомендацией становится использование наиболее острого из предлагаемых режущего инструмента. Максимальное заострение может быть достигнуто на режущих пластинах и монолитном инструменте из твердого сплава.

Для повышения качества обработанных поверхностей (уменьшения шероховатости и площади с вырывами волокон) необходимо применять встречное направление фрезерования.

Для обеспечения достаточного охлаждения инструмента и зоны обработки глубину фрезерования нужно задавать не более 0.5 от диаметра фрезы, ширину фрезерования в зависимости от необходимости задавать не более 0.6 от диаметра фрезы. При этом:

1. Охлаждение выполнять воздухом со сдувом и высасыванием опилок. Скорость резания (по частоте вращения шпинделя) уточнить из отсутствия перегрева, определяемого дымлением, а также видимым оплавлением и поджогом связующего.
2. При необходимости повышения производительности обработки (повышение скорости резанья), а также обработки в глубоких карманах, в каналах и углах применять для охлаждения смазывающую охлаждающую жидкость (СОЖ) без масляных фракций.

3. Для предотвращения проникновения СОЖ в обработанные поверхности деталей из ПКМ по завершении обработки проводится сдувание струей сжатого воздуха и дополнительный прогрев воздушным феном при температуре до 50°C.

Для увеличения производительности обработки увеличивать технологические параметры: ширина фрезерования, частота вращения шпинделя, подача. При этом не допускать превышения этих параметров (на примере фрезы диаметром 6.0мм)- ширины резания более 0.8 от диаметра фрезы, обороты не более 5000 об/мин, подача не более 800 мм/мин. Максимальная глубина фрезерования не должна превышать 0.5 от диаметра фрезы.

3.3 Разработка технологии сверления отверстий в ПКМ

В случае соединения деталей из ПКМ между собой или с другими деталями в конструкциях в них необходимо изготавливать отверстия. Сверление отверстий, так же, как и рассмотренное выше фрезерование, связано с повреждением кромок деталей. Образующиеся дефекты типа микротрещин, ворсистости, сколов связующего, расслоений обуславливают снижение как прочности, так и долговечности конструкций. При сверлении необходимо контролировать полученные повреждения, температуры в зоне обработки, а также возникающие осевые усилия. При этом наибольшее разрушающее воздействие на слоистый материал оказывает вертикальная составляющая силы резания.

3.3.1 Определение способа охлаждения зоны обработки при сверлении деталей из ПКМ

Способ охлаждения и диапазон оборотов шпинделя при сверлении деталей из ПКМ определен в разделе 3.1 настоящей диссертационной работы на основе анализа обработки тестового образца. Как и при фрезеровании отверстий в ПКМ выбрано охлаждение зоны обработки воздухом.

Анализ доступных публикаций, а также собственный опыт по сверлению углепластика, показал, что при сверлении только углепластика наилучшее качество

обработки достигается при воздушном охлаждении [26-27] или при применении в качестве охладителя CO_2 , подающегося как через инструмент, так и из внешних сопел. Однако при изготовлении отверстий в пакетах «титановый сплав - углепластик» лучшие результаты достигаются при использовании СОЖ и сверл в том числе с алмазными вставками [26].

3.3.2 Применение СОЖ при сверлении деталей из ПКМ

Применение СОЖ необходимо при совместном изготовлении отверстий в металло-композитных пакетах. В них для обеспечения соосности отверстий и плотной посадки крепежного элемента (болт, заклепка) отверстия необходимо изготавливать совместно за один проход.

С целью определения влияния применения СОЖ на качество получаемых отверстий в деталях из ПКМ выполнена контрольная обработка отверстий на типовом фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ без применения СОЖ, с применением СОЖ высокого давления и непосредственно в среде СОЖ (СОЖ подавалось при атмосферном давлении непосредственно в зону обработки, заполняя ее) в углепластиковых пластинах. СОЖ высокого давления используется при сверлении металлических материалов. СОЖ низкого давления соответствует обработке с применением ручных машинок для сверления, используемого в заводских условиях, а также этапу сверления металл-композитных пакетов при отключении подачи СОЖ на этапе обработки слоя из ПКМ.

Сравнение обработки отверстий производилось по следующим параметрам:

1. Размер повреждений на обрабатываемых кромках как со стороны входа инструмента, так и со стороны выхода;
2. Возникающие силы резания;
3. Температуры в зоне резания (измерения температуры в зоне резания производились с использованием инфракрасной камеры Flir 7700);
4. Шероховатости поверхности отверстий при обработке с СОЖ и без;

5. Испытания на статическую прочность при растяжении и усталостную долговечность образцов с концентратором напряжения в виде отверстия, изготовленного с применением СОЖ и без.

В результате исследования установлено, что качество обработки кромок отверстий в присутствии СОЖ и без неё близко по визуальной оценке. Однако используемое высокое давление СОЖ (характерное для обработки титановых сплавов) привело к растрескиванию деталей по кромкам отверстий. По-видимому, снижение давления обеспечит целостность углепластика на кромках. При обработке применялись режимы, характерные при применении ручных машинок для сверления отверстий с изменением частоты вращения сверла от 500 до 2000 об/мин.

Для всех обработок наблюдается повышение усилий резания при использовании СОЖ на 20-30%. Кроме того, при использовании СОЖ чётко прослеживается постепенное нарастание усилий резания при последовательном выполнении нескольких отверстий, чего не наблюдается при отсутствии СОЖ, рисунок 3.23, 3.24. Это позволяет предположить, что с СОЖ износ инструмента протекает интенсивнее. Во всех случаях применение СОЖ устраняет перегрев углепластика в зоне резания, что позволяет повысить производительность обработки, не допуская термическую деградацию связующего в зоне резания.

При испытании образцов с концентратором напряжений в виде отверстий на ресурс установлено, что все образцы в процессе циклического нагружения расслаиваются, теряя структурную целостность. Расслоения инициируются как в зоне отверстия, так и на обработанных отрезным алмазным диском боковых поверхностях, рисунок 3.25. На окончательный вид разрушений и количество циклов до разрушения, фрезерование отверстий с применением СОЖ или без не влияет. Результаты прочностных испытаний образцов с концентратором напряжений в виде отверстий не выявил влияния сверления с СОЖ на статическую прочность и ресурс образцов. Разрушенные после проведения прочностных испытаний образцы показаны на рисунке 3.26.

При визуальном осмотре испытываемых на ресурс образцов обнаружено, что на образцах, обработанных с применением СОЖ, расслоение в отверстиях проявляется через ~ 1000 циклов нагружения, в то время как в образцах, просверленных без применения СОЖ, расслоения проявляется, как правило, при количестве циклов нагружения около 4000. Принимая во внимание высокие скорости резания и несжимаемость СОЖ, можно предположить, что по сравнению с обработкой без СОЖ, увеличение внутренней зоны повреждения за счет гидроудара.

Для окончательного определения влияния обработки с СОЖ и без на ресурс конструкций из ПКМ целесообразно повторить ресурсные испытания на образцах в виде проушины, где через металлический крепежный элемент нагрузка будет приложена непосредственно к обработанной поверхности отверстия.

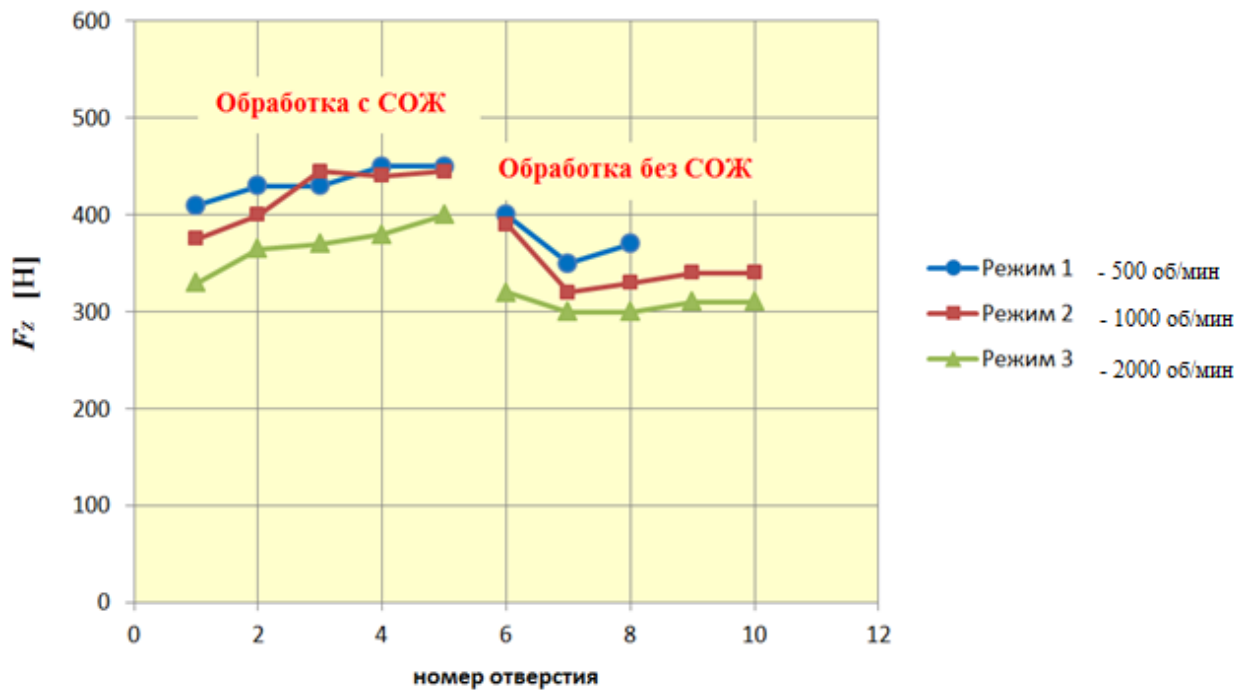


Рисунок 3.23 – Усилия резания при различных условиях обработки для каждого отверстия

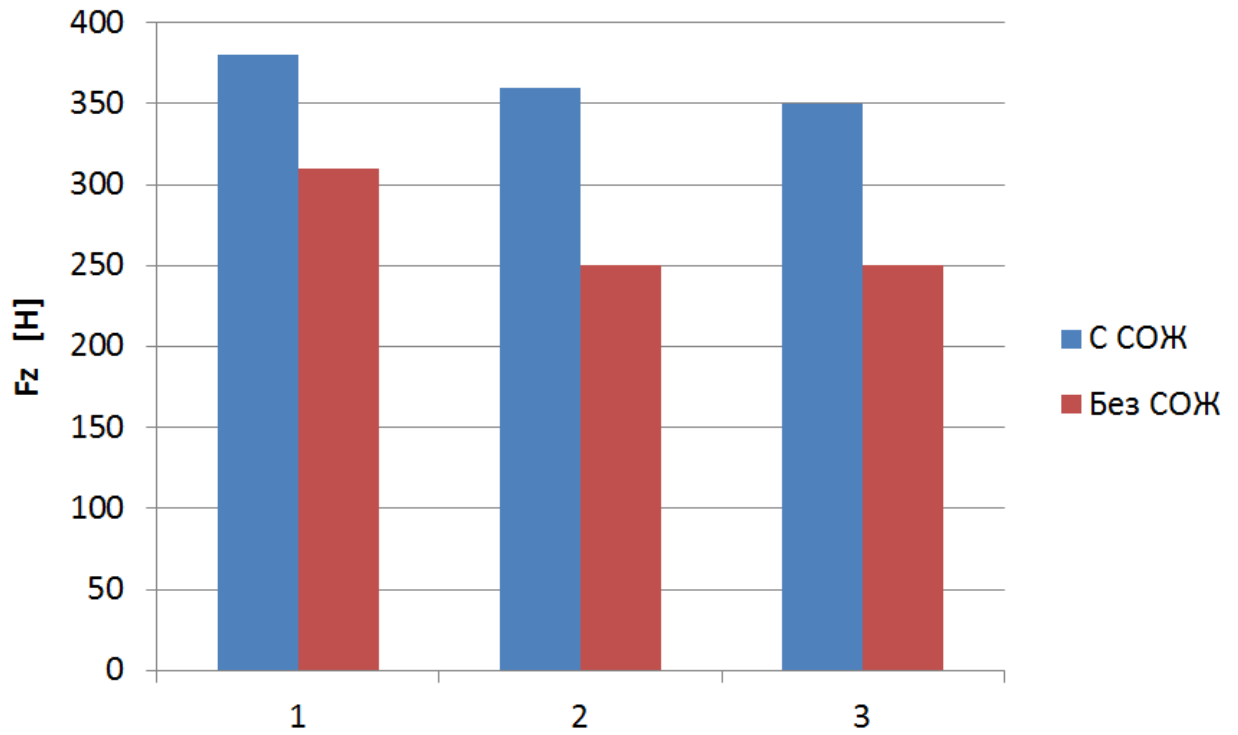


Рисунок 3.24 – Усилия резания при различных условиях обработки

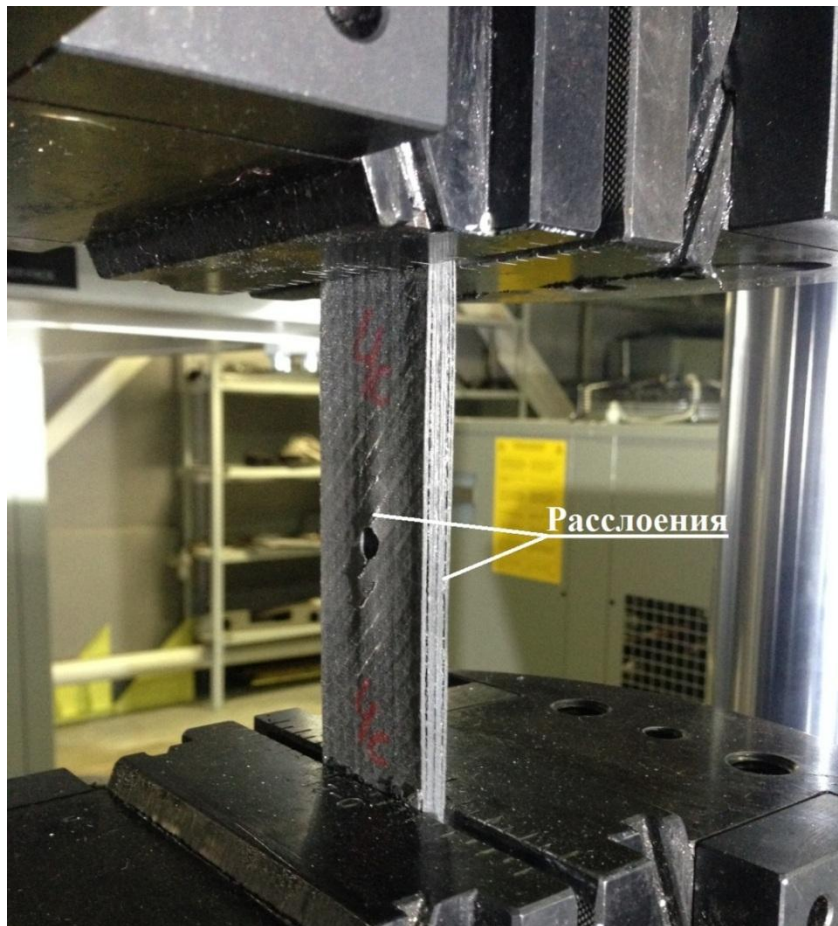


Рисунок 3.25 – Характерное расслоение образца в процессе циклического нагружения

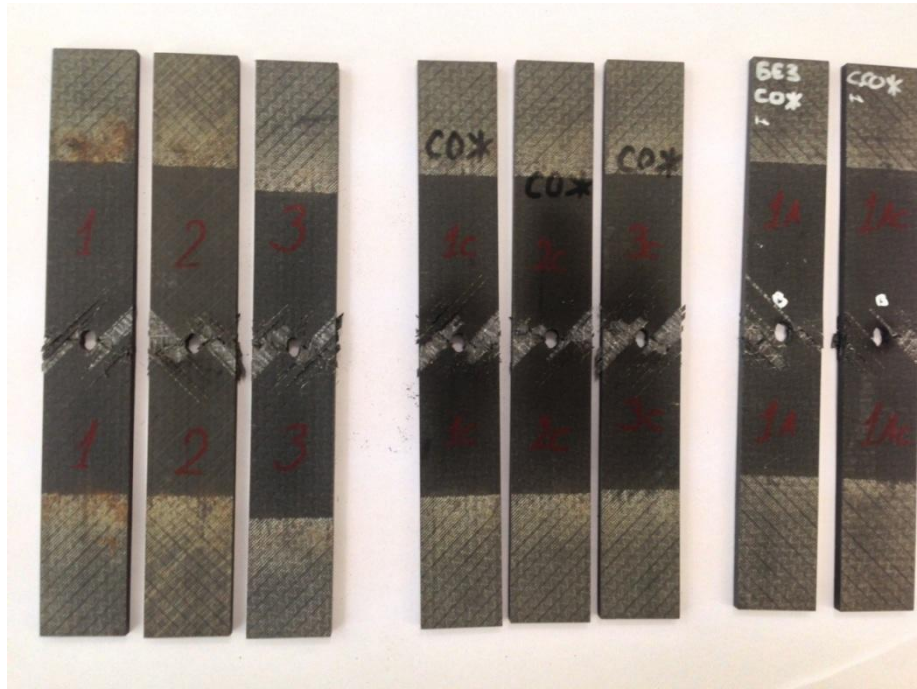


Рисунок 3.26 – Пример разрушенных образцов после проведения статических испытаний

3.3.3 Изготовление отверстий в пакетах металло-композиционных конструкций

Для проведения экспериментальных исследований использовались трехслойный пакет, состоящий из двух стальных внешних слоев толщиной около 5.0мм каждый и центрального слоя из углепластика толщиной 5.5мм.

Проведенное изготовление отверстий в металло-композиционном пакете показало, что при сверлении металлической пластины, находящейся после пластины из ПКМ, образующаяся в процессе сверления стружка наносит повреждения на кромки детали из ПКМ. Данная проблема наблюдалась и на образцах, представленных на стендах ведущих мировых производителей инструмента на выставке ЕМО-2017 (г. Ганновер, Германия), рисунок 3.27. Видны характерные повреждения от стружки на поверхности кромок пластины из ПКМ. Результаты, представленные ф. Kennametal, сопоставимы с опытом изготовления отверстий в пакетах металло-композиционного соединения в НТЦ ЦАГИ, рисунок 3.28, на которых видны повреждения от металлической стружки на поверхности обработанных кромок в детали из ПКМ.

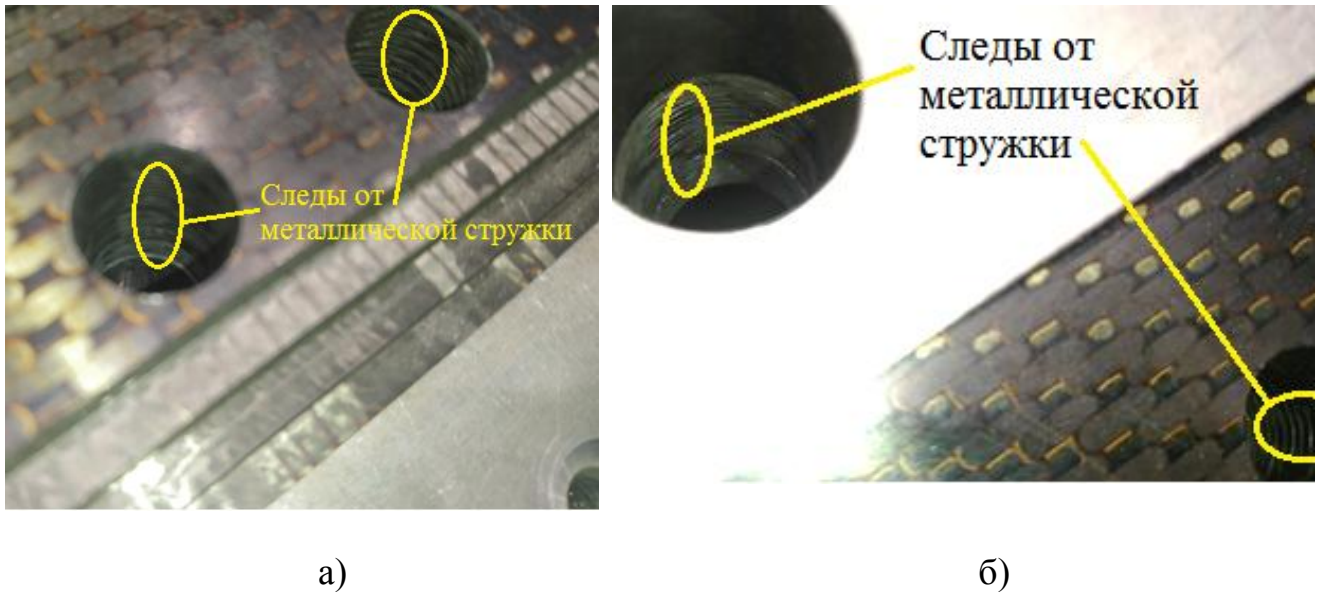


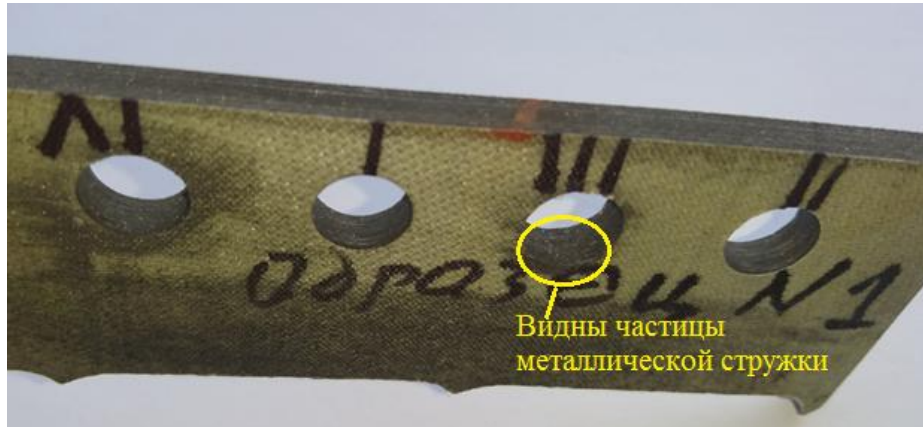
Рисунок 3.27 – Отверстия, изготовленные в пакете металл-композит, стенд ф. Kennametal на выставке ЕМО-2017 (г. Ганновер, Германия), видны следы от металлической стружки

В данной работе при сверлении были применены, в соответствии с рекомендациями для сверления металла, подача СОЖ высокого давления через инструмент, а также снаружи. Однако достаточно крупная стружка, образующаяся при сверлении нижней (по отношению к направлению сверления) металлической пластины, наносит значительные повреждения на обработанные кромки в зоне ПКМ. При этом частицы металла остаются на поверхности детали из ПКМ, рисунок 3.24А.

Для минимизации размера повреждений в пластине из ПКМ было принято решение уменьшить толщину стружки для снижения ее жесткости и, соответственно, повреждения кромок. Это возможно при изменении двух параметров сверления: увеличение частоты вращения; снижение подачи. Для оценки было проведено сверление при 3000 об/мин и 6000 об/мин. Обнаружено уменьшение повреждений на обработанной поверхности в детали из ПКМ, в отверстиях с повышенными оборотами, соответственно рисунки 3.27-3.28.

Перед проведением анализа повреждений в пластине из ПКМ образец подвергся промывке с применением ультразвуковой ванны в водном растворе с применением моющих средств. Частицы металла и угольная пыль после промывки

в ультразвуковой ванне удаляются, рисунок 3.24Б. Результаты микроскопических исследований изготовленных отверстий представлены на рисунках 3.29-3.32. Размеры дефектов на обработанных кромках со стороны входа и выхода инструмента незначительные, обнаружены следы от металлической стружки на обработанной поверхности детали из ПКМ.

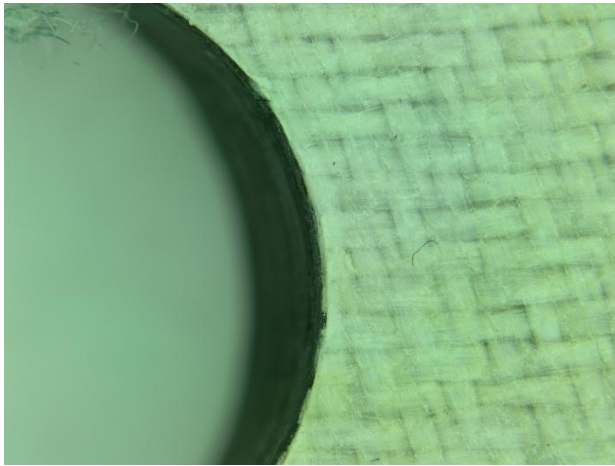


А) без чистки в ультразвуковой ванне

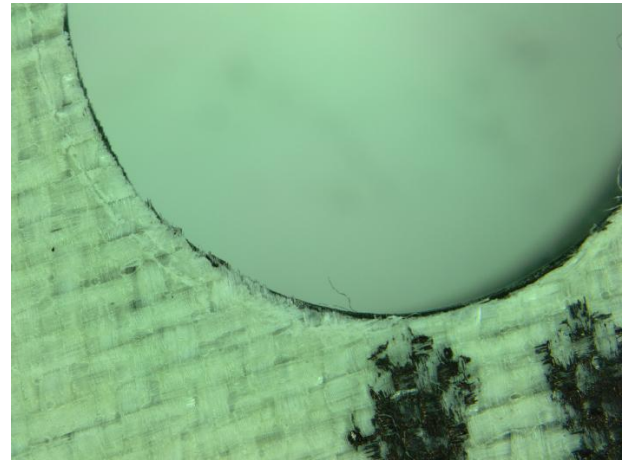


Б) после чистки в ультразвуковой ванне

Рисунок 3.28 – Отверстия в пластине из ПКМ, обработанные в составе металло-композиционного пакета

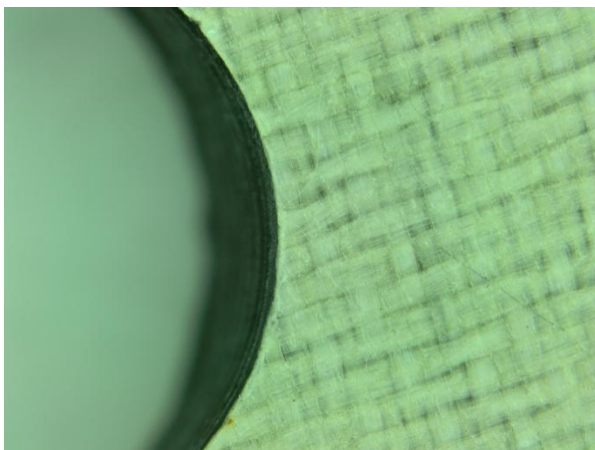


А) Вход инструмента в пластину из
ПКМ

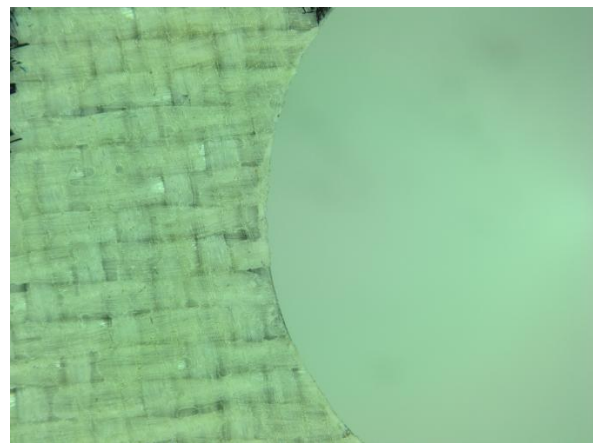


Б) Выход инструмента из пластины из
ПКМ

Рисунок 3.29 – Вид кромок отверстий при сверлении пакета металл-композит-металл



А) Вход инструмента в пластину из
ПКМ



Б) Выход инструмента из пластины из
ПКМ

Рисунок 3.30 – Вид кромок отверстий при сверлении пакета металл-композит-металл, при повышенных в 2 раза оборотах

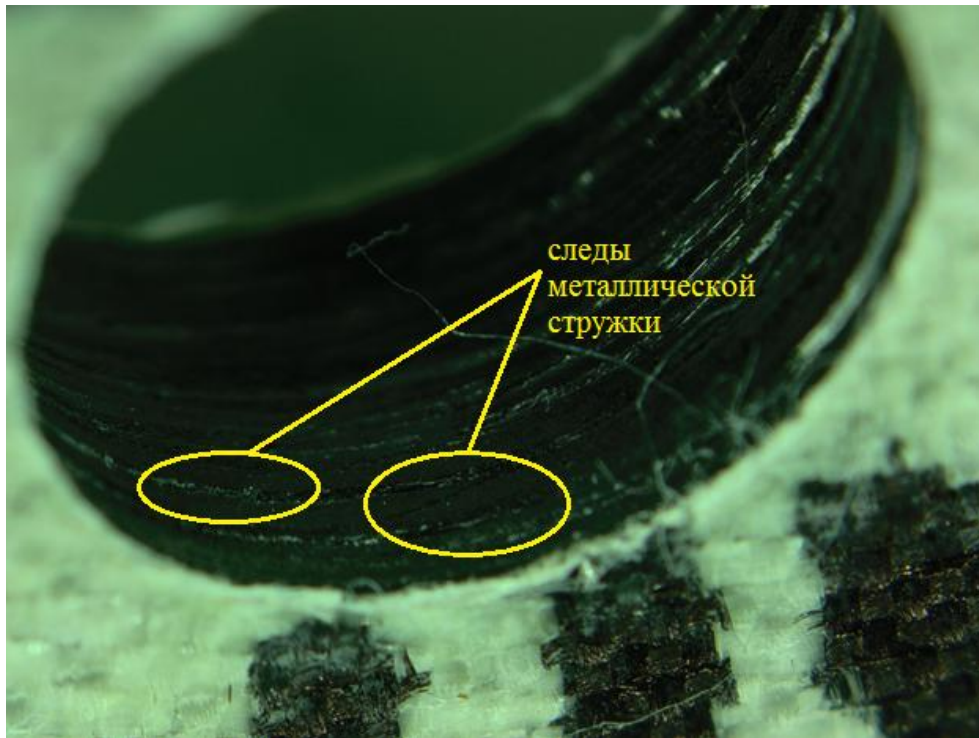


Рисунок 3.31 – Повреждения на обработанной кромке пластины из ПКМ при сверлении пакета металл-композит-металл

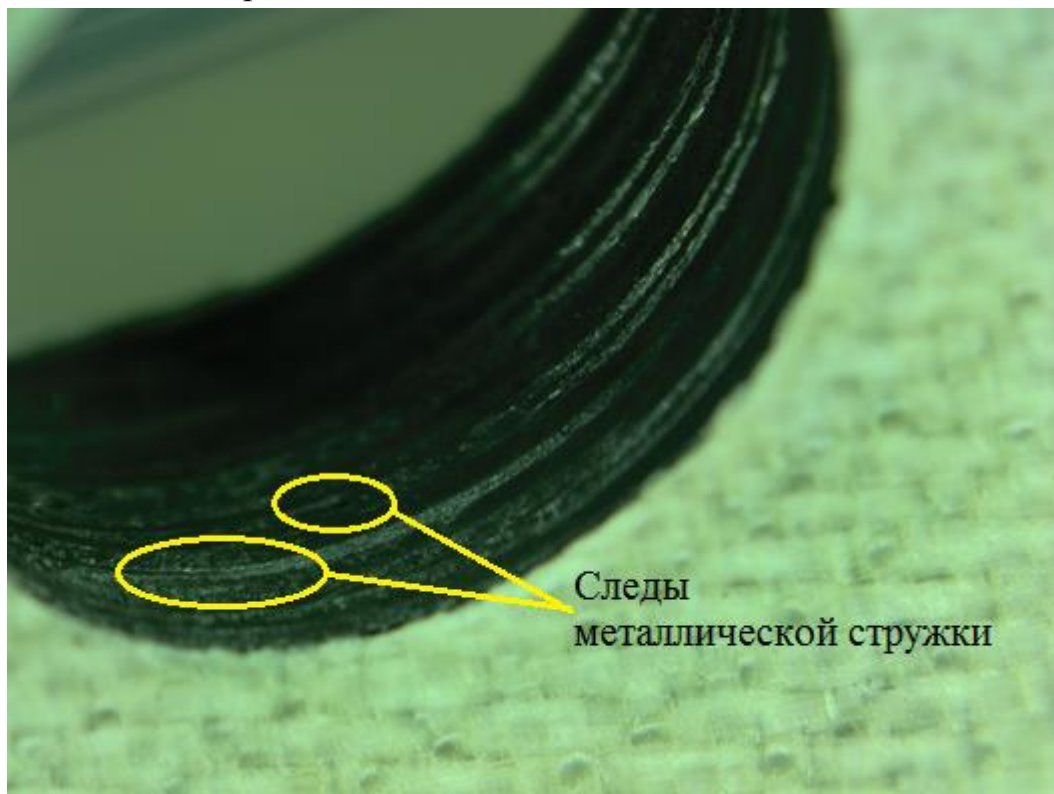


Рисунок 3.32 – Повреждения на обработанной кромке пластины из ПКМ при сверлении пакета металл-композит-металл, при повышенных оборотах

Анализ результатов изготовления отверстий в металло-композитных пакетах позволяет сформулировать предварительные рекомендации для технологии изготовления отверстий в металло-композитных конструкциях для минимизации повреждения кромок отверстий: подавать СОЖ в зону обработки под низким давлением, при этом подобрать минимальный её расход для обеспечения обработки металлических деталей пакета; повышение оборотов при сверлении приводит к уменьшению толщины стружки и, как следствие, снижает повреждаемость детали из ПКМ; для излома стружки возможно применение циклов сверления, доступных при работе на определенных стойках управления станками ЧПУ.

Видно, что повреждения кромок отверстий при повышенной до 6000 об/мин частоте вращения незначительны.

3.3.4 Технологические рекомендации по изготовлению отверстий в деталях из ПКМ

Технология сверления деталей конструкций из ПКМ

Проведенные исследования и экспериментальная обработка деталей из ПКМ, а также анализ их результатов создают основу для разработки принципиальной технологии сверления деталей из ПКМ.

Выбор режущего инструмента и его заточки

Анализ состояния кромок деталей из ПКМ после механической обработки показывает, что основным нарушением их целостности становятся растрескивание связующего и вытягивание волокон наполнителя. Базовой рекомендацией становится использование наиболее острого из предлагаемых режущего инструмента. Максимальное заострение может быть достигнуто на режущих пластинах и монолитном инструменте из твердого сплава. При обработке стоит учитывать, что повреждения слоистого полимерного композиционного материала имеются не только на поверхности обработанных кромок, но и распространяются на некоторую глубину внутрь. Данные повреждения существенно влияют на

прочностные свойства детали, в особой степени при усталостном нагружении – приводят к преждевременному расслоению в зоне обработки. В этой связи представляется целесообразным контролировать износ инструмента не только по износу режущей кромки и увеличению масштабов внешних повреждений на обрабатываемой поверхности, но и по возрастающим нагрузкам при обработке. Это можно определить проводя предварительную оценку износа инструмента на тестовом образце с применением устройства для измерения усилий резания. Для ответственных, высоконагруженных деталей из ПКМ, при возрастании усилий резания на 40% и более, необходимо производить замену режущего инструмента независимо от качества обработанных кромок с точки зрения внешних дефектов.

Поскольку обработка инструментом с алмазным напылением дает большую шероховатость на обработанных кромках по сравнению с обработкой быстрорежущей сталью можно рекомендовать следующий операционный выбор инструмента в технологическом процессе:

1. Для деталей малонагруженных – обработку (сверление) выполнять инструментом с алмазным напылением;
2. Для деталей высоконагруженных – обработку выполнять двумя инструментами:
 - предварительная обработка инструментом с режущими частями с алмазным напылением (черновой проход);
 - финишная обработка сверлом с максимально заостренной режущей кромкой; при этом, для снижения вероятности деламинации внешних слоев со стороны выхода инструмента, на последних 1.5-2.0мм обработки уменьшать подачу на 30-40%.

Охлаждение зоны обработки

При изготовлении отверстий в деталях из ПКМ

1. Охлаждение выполнять воздухом со сдувом и высасыванием опилок. Скорость резания (по частоте вращения шпинделя) уточнить по отсутствию перегрева, определяемого дымлением, а также видимым оплавлением и поджогом связующего.

2. При необходимости повышения производительности обработки (повышение скорости резанья), а также обработки в глубоких карманах, в каналах и углах применять для охлаждения смазывающую охлаждающую жидкость (СОЖ) без масляных фракций.

3. Для предотвращения проникновения СОЖ в обработанные поверхности деталей из ПКМ по завершению обработки выполнять сдувание остатков СОЖ струей сжатого воздуха с дополнительным прогревом воздушным феном при температуре до 50°C.

При изготовлении отверстий в пакетах металло-композитных конструкций

1. Для минимизации повреждения кромок отверстий подавать СОЖ в зону обработки под низким давлением, при этом подобрать минимальный её расход для обеспечения обработки металлических деталей пакета; повышение оборотов и/или снижение подачи при сверлении приводит к уменьшению толщины стружки и, как следствие, снижает повреждаемость детали из ПКМ. Для повышения производительности возможно применение циклов сверления с разными подачами, доступных при работе на определенных стойках управления станками ЧПУ.

2. Для охлаждения использовать смазывающую охлаждающую жидкость (СОЖ) без масляных фракций.

3. Для предотвращения проникновения СОЖ в обработанные поверхности деталей из ПКМ по завершению обработки проводить сдувание остатков СОЖ струей сжатого воздуха, и дополнительным прогревом воздушным феном при температуре до 50°C.

Выводы к главе 3

1. Исследовано влияние основных технологических параметров механической обработки (скорость резания, определяемая скоростью вращения шпинделя и диаметром инструмента, подача температура в зоне резания, способы охлаждения зоны обработки и др.) на качество обработки, в том числе:

- размеры повреждений на обрабатываемых кромках со стороны входа инструмента и со стороны выхода;
- момент силы резания при сверлении и фрезеровании (для большего момента, при прочих равных, характерны более высокие внутренние повреждения);
- температура в зоне обработки, превышение которой приводит к охрупчиванию связующего.

2. Представлены экспериментальные результаты влияния применения смазывающей охлаждающей жидкости при сверлении отверстий в деталях из ПКМ.

3. Сформулированы технологические рекомендации по механической обработке деталей из ПКМ.

4. 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%.

Глава 4. Экспериментальное исследование повышения прочности и ресурса соединений деталей металло-композитных авиационных конструкций и их ремонта на конструктивно-подобных образцах

В настоящей главе представлены экспериментальные результаты применения разработанных в главах 2-3 нано-модифицированной клеевой композиции для упрочнения соединений и технологии механической обработки деталей из ПКМ.

Проведены экспериментальные исследования прочности и усталостной долговечности конструктивно-подобных образцов металло-композитных соединений. Показано, что комплексное применение полученных решений позволяет повысить прочность и усталостную долговечность соединений.

Также разработанные решения применены для повышения эффективности проведения клее-механического ремонта ударных повреждений в изделиях из ПКМ. На основе результатов экспериментальной оценки остаточной прочности и жесткости деталей после ремонта представлен перспективный способ ремонта низкоэнергетических ударных повреждений в деталях из ПКМ с применением металлических вставок, устанавливаемых в детали после выборки поврежденного материала с нормированным натягом и нано-модифицированной клеевой композицией.

Для проведения экспериментальных исследований разработаны и изготовлены конструктивно- подобные образцы.

Ниже представлено детальное описание этих работ.

4.1 Разработка и изготовление конструктивно-подобных образцов соединений с использованием упрочняющей нано-модифицированной клеевой композиции

С целью проведения экспериментальных исследований по повышению прочности и долговечности металло-композитных соединений целесообразно проводить на образцах с минимальной геометрической концентрацией

напряжений. Также важным требованием к образцам является первоначальное разрушение композитной части как в случае статического разрушения, так и при циклическом знакопеременном нагружении.

Ниже приведен расчет по выбору конструктивных параметров такого соединения (стыка).

4.1.1 Расчет конструктивных параметров стыка.

Соединение должно быть спроектировано таким образом, чтобы при растяжении и сжатии композитная часть теряла прочность в первую очередь, крепежный элемент (металлические болты) во вторую очередь и остальная часть (металлические пластины) в последнюю очередь.

Выбор параметров соединения проведен с применением проектировочного расчета упруго-прочностных характеристик тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов [116] при известных параметрах композитной пластины (схема укладки, марка материала). Композитная пластина (укладка и физико-механические характеристики материалов) для применения в конструкции соединения заданы (Таблица 4.1,4.2).

В таблице 4.3 представлена схема укладки панели.

Таблица 4.1 – характеристики монослоя углепластика «HexPly M21/34%/UD194/IMA-12K»

| $d_{\text{монослоя}}$ | E_{11+} | E_{11-} | E_{22+} | E_{22-} | ν_{12} | G_{12} | σ_{11+} | σ_{11-} | σ_{22+} | σ_{22-} | $t_{12}/t_{\text{мс}}$ |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| мм | ГПа | ГПа | ГПа | ГПа | - | ГПа | МПа | МПа | МПа | МПа | МПа |
| 0.165 | 160.3 | 132.3 | 7.7 | 8.4 | 0.33 | 4.8 | 2688 | 1352 | 49.1 | 244 | 88/90 |
| мм | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | - | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² |
| 0.165 | 16340 | 13486 | 784.9 | 856.3 | 0.33 | 489.3 | 274 | 137.8 | 5 | 24.9 | 9/9.2 |

Таблица 4.2 – характеристики монослоя стеклопластика «HexPly M21/45%/120»

| $d_{\text{монослоя}}$ | E_{11+} | E_{11-} | E_{22+} | E_{22-} | ν_{12} | G_{12} | σ_{11+} | σ_{11-} | σ_{22+} | σ_{22-} | $t_{12}/t_{\text{мс}}$ |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| мм | ГПа | ГПа | ГПа | ГПа | - | ГПа | МПа | МПа | МПа | МПа | МПа |
| 0.115 | 16.8 | 16.8 | 15.2 | 15.2 | 0.16 | 4.3 | 216.7 | 457.2 | 199.5 | 427.5 | 237.5/54.9 |
| мм | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | - | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² | кгс/мм ² |
| 0.115 | 1712.5 | 1712.5 | 1549.4 | 1549.4 | 0.16 | 438.3 | 22.1 | 46.6 | 20.3 | 43.6 | 24.2/5.6 |

Таблица 4.3 – схема укладки в панели (Рисунок 3.3)

| Номер слоя | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | S |
|---------------------|--------------------|------------------------------|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----|----|-----|----|----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----|---|
| Направление укладки | 0° | 0° | 0° | +45° _o | -45° _o | +45° _o | -45° _o | 0° | 0° | 90° | 0° | 0° | +45° _o | -45° _o | +45° _o | -45° _o | 0° | |
| Материал | HexPly M21/45%/120 | HexPly M21/34%/UD194/IMA-12K | | | | | | | | | | | | | | | | |

Парциальный состав слоев в углепластиковой части:

$$\bar{n}_0 = \frac{n_0}{n_{\Sigma(V)}} = \frac{14}{32} = 0,4375;$$

$$\bar{n}_\alpha = \frac{n_\alpha}{n_{\Sigma(V)}} = \frac{8}{32} = 0,5;$$

$$\bar{n}_{90} = \frac{n_{90}}{n_{\Sigma(V)}} = \frac{2}{32} = 0,0625;$$

$$\delta_\Sigma = \delta_{yxo} = \delta_{\text{монослой}(V)} \cdot n_{\Sigma(V)} + \delta_{\text{монослой}(C)} \cdot n_{\Sigma(C)} = 32 \cdot 0,165 + 2 \cdot 0,115 = 5,51 \text{ мм} \approx 5,5 \text{ мм}.$$

Процедура расчета прочностных и упругих характеристик пакета.

Реализован алгоритм расчета прочностных и упругих характеристик пакета согласно [117].

Закон Гука для монослоя:

$$\{\sigma\} = [G^0] \cdot \{\varepsilon\}, \text{ где}$$

$$[G^0] = \begin{bmatrix} g_{11}^0 & g_{12}^0 & 0 \\ g_{21}^0 & g_{22}^0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{66}^0 \end{bmatrix}, \text{ тогда}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}^0 & g_{12}^0 & 0 \\ g_{21}^0 & g_{22}^0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{66}^0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}. \quad (4.1)$$

Компоненты матрицы жесткости в (4.1) следующие:

$$g_{11}^0 = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}};$$

$$g_{22}^0 = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}};$$

$$g_{12}^0 = g_{21}^0 = \frac{E_{11} \cdot \nu_{21}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} = \frac{E_{22} \cdot \nu_{12}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}};$$

$$g_{66}^0 = G_{12}.$$

Определим матрицу жесткости монослоя, повернутого под углом α к осям ортотропии X и Y:

Закон Гука для монослоя повернутого под углом α :

$$\{\sigma\} = [G] \cdot \{\varepsilon\}, \text{ где}$$

в формулах обозначение 1 соответствует направлению X, а 2 – направлению Y осей ортотропии в плоскости монослоя XY, кроме элементов квадратных матриц в законе Гука, где встречается и индекс 6.

$$[G] = [T_1] \cdot [G^0] \cdot [T_2]^{-1} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{16} \\ g_{21} & g_{22} & g_{26} \\ g_{61} & g_{62} & g_{66} \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

$$[T_1] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & -2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & 2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \\ \sin \alpha \cdot \cos \alpha & -\sin \alpha \cdot \cos \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \text{ – тензор вращения второй}$$

степени для напряжений,

$$[T_2] = [I] \cdot [T_1] \cdot [I]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & -\sin \alpha \cdot \cos \alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & \sin \alpha \cdot \cos \alpha \\ 2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha & -2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \text{ – тензор}$$

вращения второй степени для деформаций, где матрица (4.1) имеет вид:

$$[I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \text{ тогда}$$

Закон Гука для повернутого под углом α монослоя:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{16} \\ g_{21} & g_{22} & g_{26} \\ g_{61} & g_{62} & g_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}. \quad (4.3)$$

Определим матрицу жесткости пакета $[0^0/-\alpha/90^0]$ при известном парциальном составе слоев:

$$\bar{n}_0 = \frac{n_0}{n_\Sigma}, \quad \bar{n}_\alpha = \frac{n_\alpha}{n_\Sigma}, \quad \bar{n}_{90} = \frac{n_{90}}{n_\Sigma}.$$

Закон Гука для всего пакета:

$$\{\sigma\} = [\bar{G}] \cdot \{\varepsilon\}, \text{ где}$$

$$[\bar{G}] = [G]_0 \cdot \bar{n}_0 + [G]_\alpha \cdot \bar{n}_\alpha + [G]_{90} \cdot \bar{n}_{90}. \quad (4.4)$$

В формуле (4.4) множители $[G]_0, [G]_\alpha, [G]_{90}$ – определяются по матричному соотношению (4.2), при соответствующем угле поворота слоя α .

Суммарные жесткостные характеристики ортотропного пакета, с парциальным соотношением слоев $[0^\circ/-\alpha/90^\circ]$ определяем так:

$$E_{11\Sigma} = \frac{|\bar{G}|}{g_{22} \cdot g_{66} - g_{26}^2}, \quad E_{22\Sigma} = \frac{|\bar{G}|}{g_{11} \cdot g_{66} - g_{16}^2}; \quad (4.5)$$

$$G_{12\Sigma} = \frac{|\bar{G}|}{g_{11} \cdot g_{22} - g_{12}^2}, \quad \nu_{12\Sigma} = \frac{g_{12} \cdot g_{66} - g_{16} \cdot g_{26}}{g_{22} \cdot g_{66} - g_{26}^2}.$$

Расчет прочностных характеристик пакета (4.1) с учетом послойного моделирования, опираясь на критерий Хилла [118-119]:

$$\frac{\sigma_X^2}{\sigma_{11}^2} - \frac{\sigma_X \cdot \sigma_Y}{\sigma_{11}^2} + \frac{\sigma_Y^2}{\sigma_{22}^2} + \frac{\tau_{XY}^2}{\tau_{12}^2} \leq 1 \quad (4.6)$$

Допущения, принятые в расчете.

1. Расчетная модель укладки многослойного пакета заменена на трехслойную и рассматривается его разрушение в три этапа (Рисунок 4.1):

- Разрушение 0° -ых слоев;
- разрушение $\pm\alpha^\circ$ -ых слоев;
- разрушение 90° -ых слоев (Рисунок 4.1).

Также допускается, что эти слои при разрушении выходят из строя мгновенно и одновременно.

2. Нагрузка от растяжения, сжатия образца распределяется по трем типам слоев ($0^\circ, \pm\alpha^\circ, 90^\circ$) пропорционально их жесткостям на растяжение и сжатие.

Принятые допущения упрощают итерационные процедуры расчета (4.2) и дают возможность записать математические операции в прямом виде.

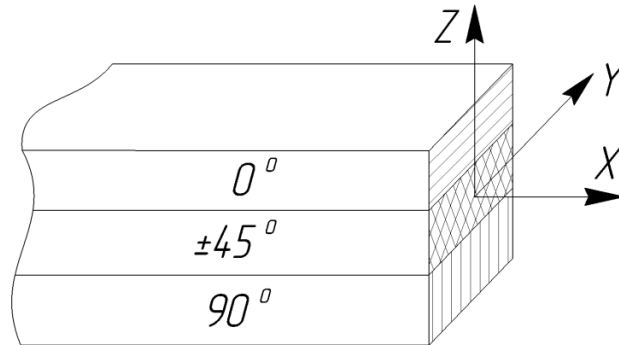


Рисунок 4.1 – схема укладки трехслойной модели пакета

Если реализовать процедуру расчета, представленную в работе [116], то получим следующие интегральные характеристики углепластиковой пластины:

HexPlyM21/34%/UD194/IMA-12K

В зоне растяжения:

$$\begin{aligned}\sigma_{11\Sigma+} &= 135,5 \text{ кгс/мм}^2; & E_{11\Sigma+} &= 8544 \text{ кгс/мм}^2; \\ \sigma_{22\Sigma+} &= 37,7 \text{ кгс/мм}^2; & E_{22\Sigma+} &= 3378 \text{ кгс/мм}^2; \\ \tau_{12\Sigma} &= 42,9 \text{ кгс/мм}^2; & G_{12\Sigma} &= 233 \text{ кгс/мм}^2; \\ & & \nu_{12\Sigma} &= 0,55.\end{aligned}$$

В зоне сжатия:

$$\begin{aligned}\sigma_{11\Sigma-} &= 69,7 \text{ кгс/мм}^2; & E_{11\Sigma-} &= 7176 \text{ кгс/мм}^2; \\ \sigma_{22\Sigma-} &= 21,3 \text{ кгс/мм}^2; & E_{22\Sigma-} &= 2959 \text{ кгс/мм}^2; \\ \tau_{12\Sigma} &= 42,9 \text{ кгс/мм}^2. & G_{12\Sigma} &= 1979 \text{ кгс/мм}^2; \\ & & \nu_{12\Sigma} &= 0,53.\end{aligned}$$

Интегральные характеристики внешнего пакета из стеклопластика укладки ткани $[0^0/0^0]$:

HexPly M21/45%/120

В зоне растяжения:

$$\sigma_{11\Sigma+} = 21,2 \text{ кгс/мм}^2; \quad E_{11\Sigma+} = 163 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\begin{aligned}\sigma_{22\Sigma+} &= 21,2 \text{ кгс/мм}^2; & E_{22\Sigma+} &= 1631 \text{ кгс/мм}^2; \\ \tau_{12\Sigma} &= 5,6 \text{ кгс/мм}^2; & G_{12\Sigma} &= 438 \text{ кгс/мм}^2; \\ & & \nu_{12\Sigma} &= 0,15.\end{aligned}$$

В зоне сжатия:

$$\begin{aligned}\sigma_{11\Sigma-} &= 45,1 \text{ кгс/мм}^2; & E_{11\Sigma-} &= 1631 \text{ кгс/мм}^2; \\ \sigma_{22\Sigma-} &= 45,1 \text{ кгс/мм}^2; & E_{22\Sigma-} &= 1631 \text{ кгс/мм}^2; \\ \tau_{12\Sigma} &= 5,6 \text{ кгс/мм}^2. & G_{12\Sigma} &= 438 \text{ кгс/мм}^2; \\ & & \nu_{12\Sigma} &= 0,15.\end{aligned}$$

Суммарные характеристики панели определены по «правилу смесей» [8]:

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

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

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

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

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

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

$$\nu_{12\Sigma(\text{панета})} = \nu_{12\Sigma(Y)} \cdot \bar{n}_{(Y)} + \nu_{12\Sigma(C)} \cdot \bar{n}_{(C)},$$

где индекс Y- относится к углепластику, С – относится к стеклопластику,

$$\bar{n}_{(Y)} = \frac{n_{(Y)} \cdot \delta_{(Y)}}{n_{(Y)} \cdot \delta_{(Y)} + n_{(C)} \cdot \delta_{(C)}} = \frac{32 \cdot 0,165}{32 \cdot 0,165 + 2 \cdot 0,115} = 0,9583,$$

$$\bar{n}_{(C)} = \frac{2 \cdot 0,115}{32 \cdot 0,165 + 2 \cdot 0,115} = 0,0417.$$

Суммарные характеристики прочности:

$$\sigma_{11\Sigma+(\text{панета})} = 135,5 \cdot 0,9583 + 21,2 \cdot 0,0417 = 130,7 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\sigma_{22\Sigma+(\text{панета})} = 37,7 \cdot 0,9583 + 21,2 \cdot 0,0417 = 37 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\tau_{12\Sigma(\text{панета})} = 42,9 \cdot 0,9583 + 5,6 \cdot 0,0417 = 41,3 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$E_{11\Sigma+(\text{панета})} = 8544 \cdot 0,9583 + 1631 \cdot 0,0417 = 8256 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$E_{22\Sigma+(\text{пакета})} = 3378 \cdot 0,9583 + 1631 \cdot 0,0417 = 3305 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$G_{12\Sigma(\text{пакета})} = 1 / \left(\frac{\bar{n}_{(Y)}}{G_{12\Sigma(Y)}} + \frac{\bar{n}_{(C)}}{G_{12\Sigma(C)}} \right) = 1 / \left(\frac{0,9583}{2331} + \frac{0,0417}{438} \right) = 1975 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$v_{12\Sigma(\text{пакета})} = 0,55 \cdot 0,9583 + 0,15 \cdot 0,0417 = 0,53.$$

Суммарные характеристики пакета в зоне сжатия:

$$\sigma_{11\Sigma-(\text{пакета})} = 69,7 \cdot 0,9583 + 45,1 \cdot 0,0417 = 68,7 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\sigma_{22\Sigma-(\text{пакета})} = 21,3 \cdot 0,9583 + 45,1 \cdot 0,0417 = 22,3 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$\tau_{12\Sigma(\text{пакета})} = 42,9 \cdot 0,9583 + 5,6 \cdot 0,0417 = 41,3 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$E_{11\Sigma-(\text{пакета})} = 7176 \cdot 0,9583 + 1631 \cdot 0,0417 = 6945 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$E_{22\Sigma-(\text{пакета})} = 2959 \cdot 0,9583 + 1631 \cdot 0,0417 = 2904 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$G_{12\Sigma(\text{пакета})} = 1 / \left(\frac{\bar{n}_{(Y)}}{G_{12\Sigma(Y)}} + \frac{\bar{n}_{(C)}}{G_{12\Sigma(C)}} \right) = 1 / \left(\frac{0,9583}{1979} + \frac{0,0417}{438} \right) = 1726 \text{ кгс/мм}^2;$$

$$v_{12\Sigma(\text{пакета})} = 0,53 \cdot 0,9583 + 0,15 \cdot 0,0417 = 0,51.$$

4.2.1 Выбор параметров соединения

Для расчета соединения необходимо выбрать рациональный диаметр крепежного элемента. В исследованиях [120] было показано, что оптимальный диаметр крепежного элемента в соединениях типа «Ухо-вилка» выбираем из условия (Рисунок 4.2):

$$d = 1,25 \cdot \delta = 1,25 \cdot 5,5 = 6,9 \text{ мм.}$$

Таким образом, выбран ближайший стандартный болт размером М6 из стали 30ХГСА-Ш, ГОСТ 4543-71, ТУ 1-92-156-90.

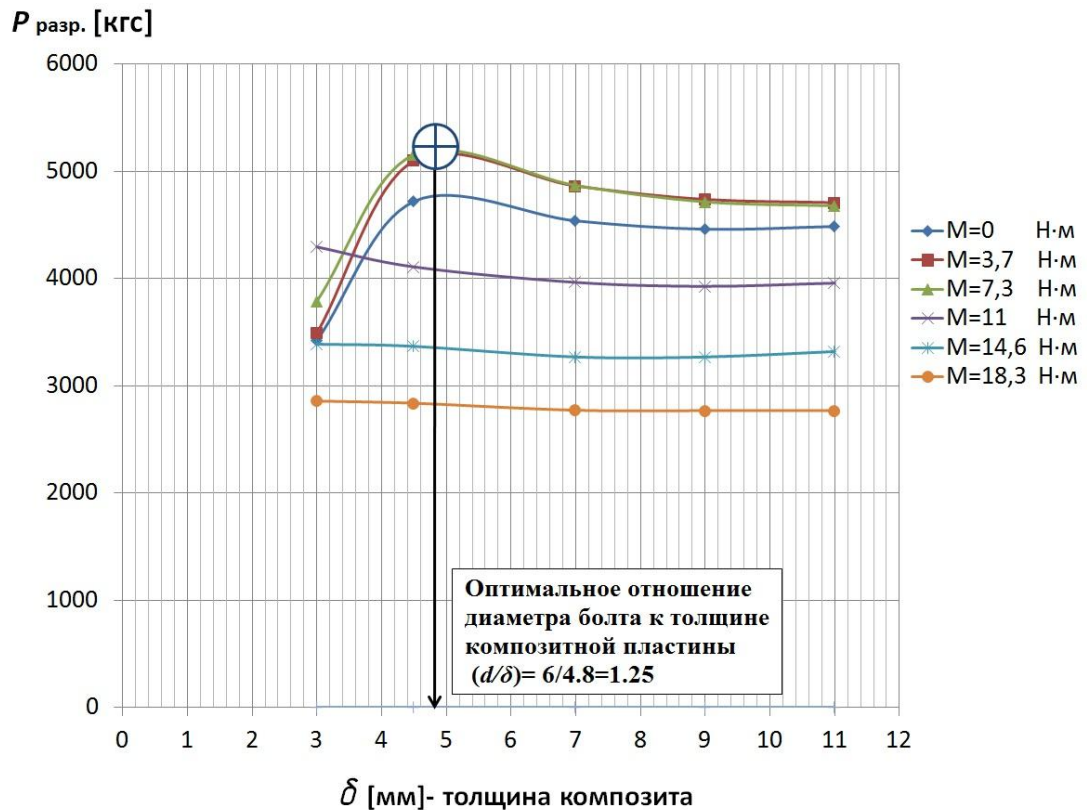


Рисунок 4.2 – Разрушающая нагрузка от растяжения одноточечного соединения «Ухо-вилка» ($d = 20\text{мм}$) в зависимости от толщины композитной пластины

Рациональная затяжка болта определена также из [16], где было показано, что если эксплуатационные нагрузки на силовой узел близки к разрушающим ($\sim 70\text{-}80\%$ от предельных, именно таковы условия испытаний проектируемых образцов на усталость), то болты не обязательно затягивать до $60\text{-}70\%$ от предельного уровня, как рекомендует ОСТ 1 00017-89. В работе [16] было показано, что при затяжке болтов на уровне $\sim 60\text{-}70\%$ от предельного значения, болты становятся более высоконесущими к восприятию статических нагрузок (Рисунок 4.3). Из рисунка 4.3 видно, что максимальная затяжка болта в этом случае находится на уровне $1/3$ от максимального разрушающего значения.

Затяжка болта М6 определена по формуле:

$$M_{\text{зат.}} = k_{\text{тр.}} \cdot N_{\text{зат.}} \cdot d, \text{ где}$$

$k_{\text{тр.}} = 0,12$ – коэффициент сухого трения поверхностей контакта металл-металл;

$N_{\text{зат.}}$ – усилие затяжки болта [Н];

$d = 6\text{мм} = 0,006 \text{ м}$ – диаметр болта [м].

Усилие затяжки болта 1/3 от максимального разрушающего для испытания проектируемого образца на «статике» (Рисунок 4.3):

$$N_{зам.} = \frac{1}{3} \cdot N_{max.} = \frac{1}{3} \cdot \sigma_{B(30XГСА)} \cdot F_{M6} = \frac{1}{3} \cdot \sigma_{B(30XГСА)} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{1}{3} \cdot 110 \cdot \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 10367 \text{ кгс} = 10170 \text{ Н}$$

$$M_{зам.} = k_{тр.} \cdot N_{зам.} \cdot d = 0,12 \cdot 10170 \cdot 0,006 = 7,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При проектировании соединения для испытания на усталость усилие затяжки болта - 2/3 от максимального разрушающего согласно ОСТ 1 00017-89 (Рисунок 4.3):

$$N_{зам.} = \frac{2}{3} \cdot N_{max.} = \frac{2}{3} \cdot \sigma_{B(30XГСА)} \cdot F_{M6} = \frac{2}{3} \cdot \sigma_{B(30XГСА)} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{2}{3} \cdot 110 \cdot \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 20734 \text{ кгс} = 20340 \text{ Н}$$

$$M_{зам.} = k_{тр.} \cdot N_{зам.} \cdot d = 0,12 \cdot 20340 \cdot 0,006 = 14,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

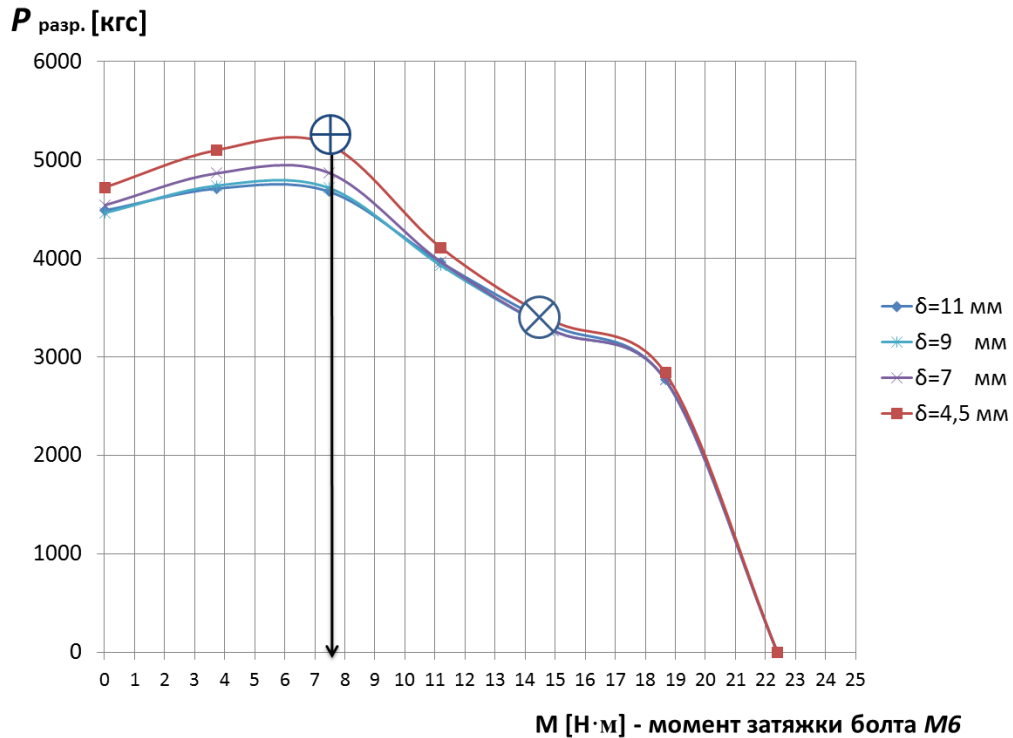


Рисунок 4.3 – Разрушающая нагрузка от растяжения одноточечного соединения типа «Ухо-вилка» в зависимости от момента затяжки болта ($d=6\text{мм}$)

Необходимое количество болтов для проектируемого соединения определяется исходя из условия, что болты должны потерять несущую способность только после выхода из строя композитной пластины, для чего использовано уравнение баланса сил при смятии композитной пластины под крепежным элементом (4.7) и при срезе болта от сдвиговых усилий (4.8):

$$\sigma_{\text{смятие}} = \frac{P}{n \cdot \delta_{\text{ухо}} \cdot d} \leq \sigma_{11\Sigma-(\text{накета})}; \quad (4.7)$$

$$\tau_{\text{срез.}} = \frac{P}{m \cdot n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} \leq \tau_B, \quad \text{где} \quad (4.8)$$

n – количество крепежных элементов;

$m = 2$ – количество плоскостей среза (системы «Ухо-вилка»);

P – нагрузка на растяжение пластины.

Если предположить условие достижения предела прочности композитной пластины $\sigma_{11\Sigma+(\text{накета})}$ в неравенстве (4.7), выразить из него P и подставить в 4.8, то получим:

$$\tau_{\text{срез.}} = \frac{4 \cdot \sigma_{11\Sigma-(\text{накета})} \cdot \delta_{\text{ухо}}}{m \cdot \pi \cdot d} \leq \tau_B \Rightarrow \frac{4 \cdot 68,7 \cdot 5,5}{2 \cdot \pi \cdot 6} = 40,1 \text{ кгс/мм}^2 < 71,5 \text{ кгс/мм}^2; \quad (4.9)$$

Как видно, неравенство (4.9) выполняется при любом количестве болтов, что означает, что при заданных параметрах можно с большой вероятностью ожидать разрушения сначала композитной пластины (смятием) и затем металлических крепежных элементов.

Далее толщина металлических пластинок («Вилки») определена из условия гарантии ее разрушение в последнюю очередь. Например, условие для выбора толщины можно записать так:

$$2 \cdot \delta_{\text{вилка}} \geq \delta_{\text{ухо}} \cdot \frac{\sigma_{B(\text{Ухо})}}{\sigma_{B(\text{Вилка})}},$$

Если предположить, что металлические пластины изготавливаются из стали 30ХГСА, то получим:

$$\delta_{\text{вилка}} \geq \frac{\delta_{\text{ухо}}}{2} \cdot \frac{\sigma_{11\Sigma+(\text{накета})}}{\sigma_{B(30ХГСА)}} = \frac{5,5}{2} \cdot \frac{135,5}{110} = 3,4 \text{ мм.}$$

Для определенности толщина металлических пластинок («Вилки») принята близкой к толщине композитной проушины («Уха»):

$$\delta_{\text{вилка}} = 5 \text{ мм.}$$

Заданная разрушающая нагрузка на образцы стыкового узла соединения, $P = 10 \text{ тс} = 10\,000 \text{ кгс}$, определена из условия допустимой нагрузки при испытаниях на разрывной машине, позволяет определить количество соединительных болтов:

Из (4.7) количество болтов для проектировочной нагрузки P

$$n = \frac{P}{\sigma_{11\Sigma-(накета)} \cdot \delta_{yxo} \cdot d} = \frac{10000}{69,7 \cdot 5,5 \cdot 6} = 4,3.$$

Диаметр и количество крепежных элементов определены согласно [7-9], далее определяются все остальные параметры для соединения.

Перемычка вдоль действия нагрузки определена из рисунка 4.4 -

$$H_1 = 2,5 \cdot d = 15 \text{ мм},$$

Перемычка перпендикулярная к действующей нагрузке определена из рисунка 4.5 - $H_2 = 2 \cdot d = 12 \text{ мм}$;



Рисунок 4.4 – Зависимость коэффициентов концентрации напряжений от относительного расстояния H/d до края ортотропной пластины при относительной ширине пластины $d/B=0,3$

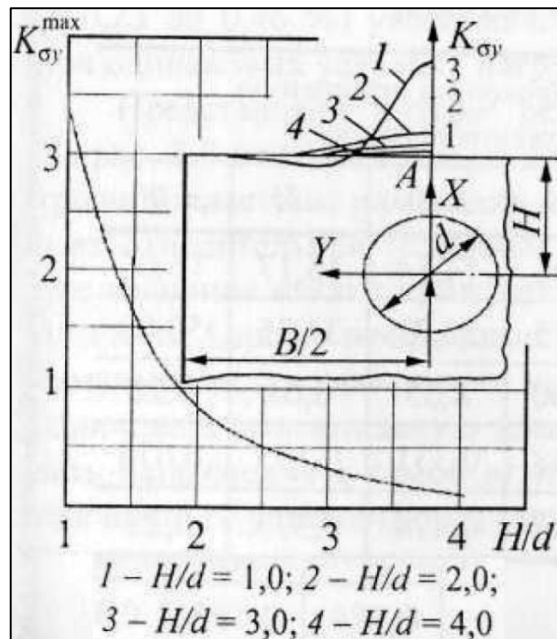


Рисунок 4.5 – Зависимость коэффициентов концентрации в точке А от относительного расстояния H/d от края ортотропной пластины

Для определенности единая перемычка принята $H = \min\{H_1, H_2\} = 12 \text{ мм}$. Минимальная величина выбрана из условия экономии габаритов (компактности) и минимума веса конструкции.

Шаг между крепежными элементами определен из условия минимального влияния соседних крепежных элементов друг на друга.

Проведенные исследования на основе моделирования методом конечного элемента (МКЭ) показывают, что данный параметр следует выбирать из условия:

$$t = [4...5] \cdot d = 24...30 \text{ мм},$$

Для определенности параметр выбран равным 4-м калибрам диаметра крепежного элемента ради экономии габаритов и веса конструкции:

$$t = 4 \cdot d = 24 \text{ мм},$$

Все необходимые параметры соединения найдены. Следующий этап - определение расположения крепежных точек в соединении. Для снижения стоимости образцов (композитных пластинок) рационально использовать

двурядное расположение крепежных точек 2x2. Двойная рядность также предпочтительна с точки зрения более равномерного перераспределения нагрузок между ними (Рисунок 4.6). На рисунке 4.6 показаны перераспределения сил в двурядных и трехрядных соединениях, полученные в эксперименте согласно [16]:

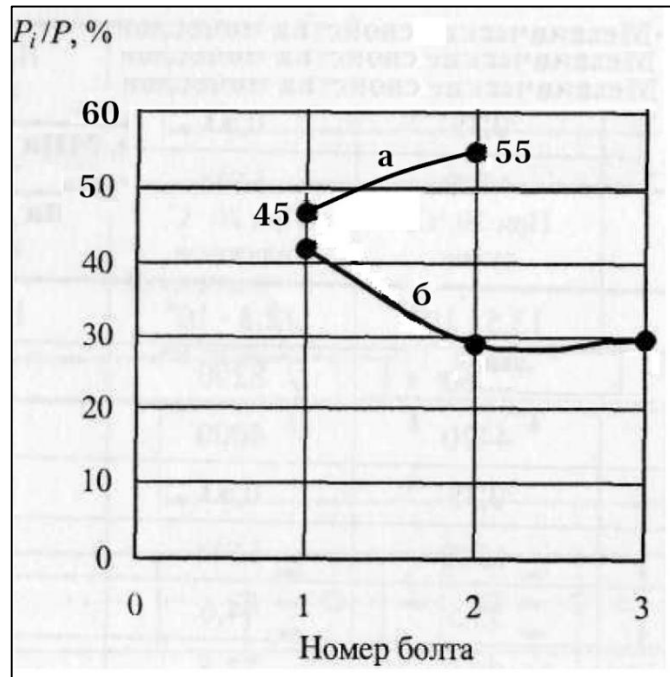


Рисунок 4.6 – Распределение сил по рядам крепежных точек, два ряда (а), три ряда (б)

Рассмотрены два варианта расположения крепежных точек: «прямоугольное» и «ромбовидное». На рисунках 4.7 и 4.8 представлены картины распределения напряжений в соединении при двух выше указанных вариантах расположений крепежных элементов. Из рисунка 4.7 и 4.8 можно видеть, что поле напряжений в композитной пластине в прямоугольной схеме расположения крепежных элементов более равномерное (рисунок 4.7), чем в ромбовидном (рисунок 4.8). Отношение напряжений между максимально нагруженной и минимально нагруженной точками равны:

$$102/34 = 3 \text{ (см. Рисунок 4.7);}$$

$$122/30 = 4 \text{ (см. Рисунок 4.8).}$$

Отношение расчетных реакций в крепежных элементах между максимально нагруженной и минимально нагруженной точками равны:

$$30.4\%/19.6\% = 1.6 \text{ (см. Рисунок 4.7);}$$

33%/16.6% = 2 (см. Рисунок 4.8).

Исходя из этих результатов целесообразно использовать прямоугольное расположение крепежных элементов.

На рисунке 4.9 представлена окончательная конструкция образца металлокомпозитного соединения. Ширина углепластиковой пластины (размер B) выбрана таким образом, чтобы композитная пластина («Ухо») была равнопрочной по разрыву сечения по болтам и по срезу перемычек (отмечаны красными линиями на рисунке 4.9):

Разрыв сечения по болту М6 (Рисунок 4.9):

$$\sigma_{\text{растяжение}} = \frac{k_{\text{брутто}} \cdot (P/n)}{2 \cdot H \cdot \delta_{\text{Ухо}}} = \frac{5 \cdot (10000/4)}{2 \cdot 12 \cdot 5,5} = 94,7 \text{ кгс/мм}^2 < \sigma_{11\Sigma+(\text{накета})} = 130,7 \text{ кгс/мм}^2; \quad (4.10)$$

Срез перемычек (Рисунок 4.9):

$$\tau_{\text{срез}} = \frac{P}{4 \cdot (T + H_1) \cdot \delta_{\text{Ухо}}} = \frac{10000}{4 \cdot (24 + 12) \cdot 5,5} = 12,6 \text{ кгс/мм}^2 < \tau_{12\Sigma(\text{накета})} = 41,3 \text{ кгс/мм}^2; \quad (4.11)$$

В уравнении 4.10 коэффициент концентрации напряжений берется согласно [8,9], (см.рисунок 4.10).

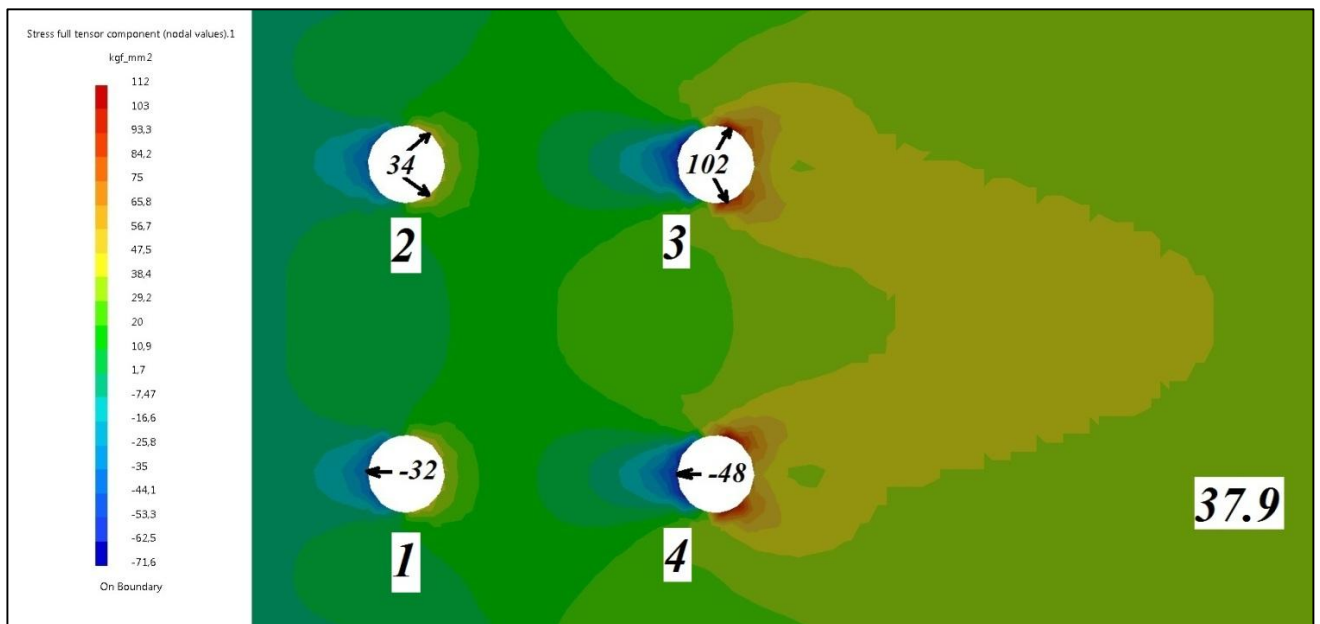


Рисунок 4.7 – Поле напряжений в пластине вдоль действия нагрузки $P = 10\,000$ кгс (толщина пластины $\delta = 5.5$ мм ширина $B = 48$ мм), перераспределение усилий между болтами: (1-19.6%, 2-19.6%, 3-30.4%, 4-30.4%)

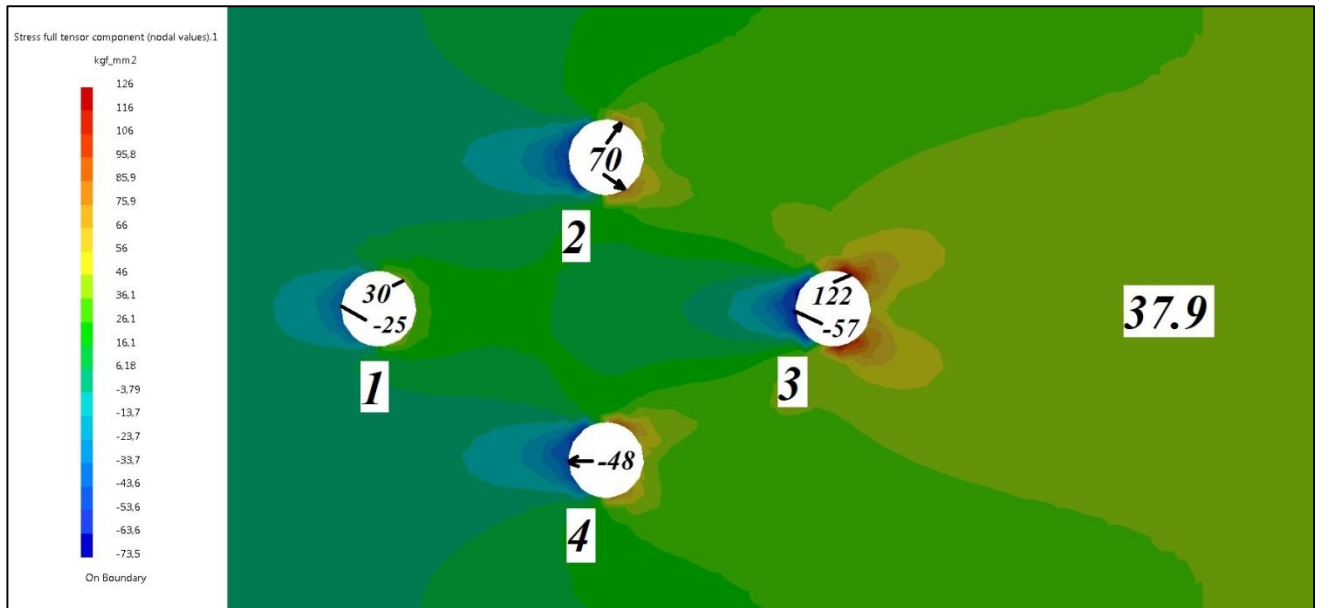


Рисунок 4.8 – Поле напряжений в пластине вдоль действия нагрузки $P = 10\,000$ кгс (толщина пластины $\delta = 5.5$ мм ширина $B = 48$ мм), перераспределение усилий между болтами: (1-16.6%, 2-25.2%, 3-33%, 4-25.2%)

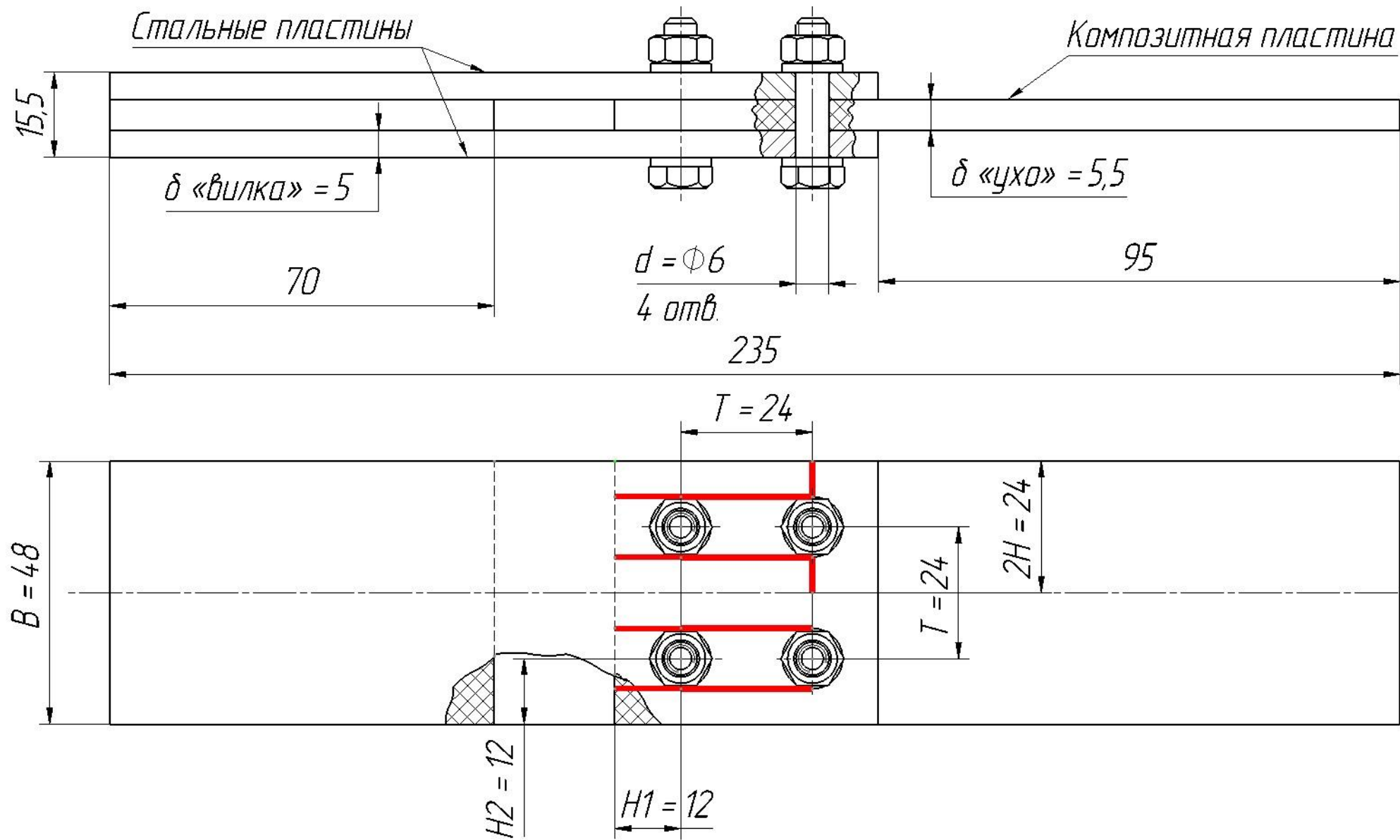


Рисунок 4.9- Конструкция металлокомпозитного соединения

4.1.2 Сборка конструктивно-подобных металл-композитных соединений с применением наномодифицированной клеевой композиции

Разработанные конструктивно-подобные соединения были изготовлены в опытном производстве ЦАГИ в количестве 12 образцов.

Сборка соединений производилась согласно патенту РФ №260788 «Способ повышения прочности болтового металло-композиционного соединения». Так, упрочняющий слой НКК наносился только на поверхность крепежного болта и внутренние поверхности отверстий в соединяемых деталях. (рисунок 4.11, 4.12).

Подготовка контактных поверхностей металлических болтов:

- протирка ≥ 2 раз поверхности тампоном из чистой ваты, смоченной бензином БР-1;
- выдержка на воздухе ≥ 15 минут;
- промывка ацетоном ≥ 2 раза;
- выдержка на воздухе ≥ 5 минут;
- обдувка электрокорундовым песком (ПИ 1.2.132-79, п 3.4) с величиной зерна № 20 по режиму: давление 4-5 атм, $(3.9-4,9)10^5$ Па, расстояние при обдувке не более 25 см (ПИ 1.2.178-81, п 3.4). Либо произвести зачистку поверхности ручным способом наждачной бумагой, без нажима.
- смывка ацетоном (легкой щеточкой) частиц оставшихся на поверхности.

Поверхность углепластиковой детали обрабатывалась механически мелкозернистой наждачной бумагой с последующим обдувом сжатым воздухом непосредственно перед нанесением упрочняющей клеевой композиции.

Затяжка болтов осуществлялась при помощи динаметрического ключа с моментом затяжки, рассчитанным в параграфе 4.1.2, $M_{зат.} = 14,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$. В процессе сборки соединений металлические элементы плотно прилегали к углепластиковой детали, что предотвращало попадание клеевой композиции между ними.

Общий вид собранных и подготовленный образцов показан на рисунке 4.13.

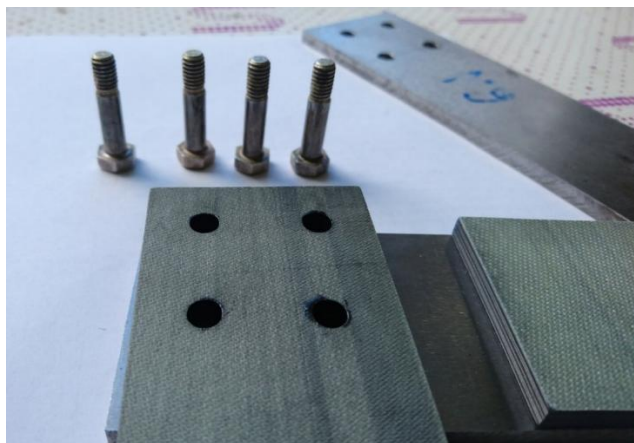


Рисунок 4.11 – Нанесение НКК на поверхность болтов и внутреннюю поверхность отверстия в композитной детали



Рисунок 4.12 – Фотоизображение металлической и композитной частей соединения с нанесенной НКК на внутренние поверхности отверстий



Рисунок 4.13 – Общий вид подготовленных для проведения прочностных испытаний 12 образцов металло-композитных соединений (верхний ряд образцы в исходном состоянии, нижний ряд образцы упрочненные НКК)

4.2 Результаты испытаний образцов и их анализ

Испытания образцов проводили на электрогидравлической испытательной машине типа Schenck -100 при скорости нагружения 250 кгс/сек .

В процессе этих испытаний фиксировали значение предельной нагрузки в момент разрушения образца, при усталостных испытаниях предельное количество циклов нагружения до разрушения образца.

В таблица 4.4 и 4.5 представлены результаты испытаний образцов при статическом растяжении.

Таблица 4.4 Результаты испытаний на: статическое растяжение, $T_u=+20^{\circ}\text{C}$, образцы в исходном состоянии. Скорость нагружения 250 кг/с

| № | t , мм | P , кгс | σ , кгс/мм ² |
|-------------------------|----------|-----------|--------------------------------|
| СТ1 | 6 | 11181 | 77.65 |
| СТ2 | 6 | 10628 | 73.81 |
| Среднее значение | | 10905 | 75.73 |
| Коэффициент вариации, % | | 3.6 | 3.6 |

Таблица 4.5 Результаты испытаний на: статическое растяжение, $T_u=+20^{\circ}\text{C}$, образцы упрочненные наномодифицированной клеевой композицией. Скорость нагружения 250 кг/с.

| № | t , мм | P , кгс | σ , кгс/мм ² |
|-------------------------|----------|-----------|--------------------------------|
| СТУ1 | 6 | 13366 | 92.82 |
| СТУ2 | 6 | 13749 | 95.48 |
| Среднее значение | | 13558 | 94.15 |
| Коэффициент вариации, % | | 2.0 | 2.0 |

Анализ изломов испытанных образцов показал, что образцы разрушаются смятием болтом поверхности отверстия на начальном этапе нагружения и разрушением путем сдвига на завершающем этапе нагружения (Рисунок 4.14).

По данным таблиц 4.4 и 4.5 видно, что упрочнение соединений при помощи НМК (с применением «Способ повышения прочности болтового металлокомпозиционного соединения» согласно патенту РФ №260788) приводит к повышению прочности при растяжении образцов в среднем на 20%.

На рисунке 4.14 представлены образцы после испытаний при статическом растяжении.

Для испытаний на усталостную долговечность образцов был выбран циклический, знакопеременный режим нагружения с частотой 5Гц, нагрузкой при растяжении, составляющей 80% от средней разрушающей нагрузки, полученной при испытаниях исходных образцов, равной $P_{рас}=0.8 \times 10905=8724$ кгс, и нагрузкой при сжатии $P_{сж}=438$ кгс, что соответствует коэффициенту асимметрии $R=-0.05$.

В процессе нагружения образцов P1 и PУ1 образцы имели существенный нагрев в зоне крепежа. Температуру замерить не удалось, т.к. образцы разрушились в течении короткого периода времени. При этом невозможно было прикоснуться к испытываемым образцам. Высокие температуры существенно снижают прочностные характеристики применяемой НМК, что существенно снижает эффективность ее применения. С целью уменьшения нагрева исследуемых образцов для последующих испытаний был изменен режим нагружения – знакопеременный режим нагружения с частотой 3Гц и нагрузкой при растяжении составляющей 62% от средней разрушающей нагрузки, полученной при испытаниях исходных образцов, равной $P_{рас}=0.6 \times 10905=6708$ кгс, и нагрузкой при сжатии $P_{сж}=335$ кгс, что соответствует коэффициенту асимметрии $R=-0.05$.

В процессе испытаний образцов постоянно проводился замер температуры с использованием пирометра ADA THERMPRO 1200. Обнаружено, что образцы упрочненные НМК, в среднем, имеют температуру в зоне соединения на 5°С ниже по сравнению с исходными. Понижение температуры упрочненных соединений обеспечило исключение возможности перемещения элементов соединения за счет обеспечения плотных посадок крепежных элементов.

На рисунке 4.15 представлены исходные образцы после испытаний на усталостную долговечность.

Таблица 4.6. Результаты испытаний на: усталость, $R=-0.05$, $T_{и}=+20^{\circ}\text{C}$, образцы P1, P2, P3 и СТЗ в исходном состоянии, образцы РУ1, РУ2, РУ3 и СТУЗ - упрочненные наномодифицированной клеевой композицией

| № | t , мм | P_{max} , кг | P_{min} , кг | f , Гц | N , циклы | $P_{ост}$, кг |
|-------------------------|----------|----------------|----------------|----------|-------------|----------------|
| P1 | 6 | 8724 | -436 | 5 | 2741 | – |
| РУ1 | 6 | 8724 | -436 | 5 | 5222 | – |
| P2 | 6 | 6708 | -335 | 3 | 115553 | – |
| P3 | 6 | 6708 | -335 | 3 | 61457 | – |
| СТЗ | 6 | 6708 | -335 | 3 | 166777 | – |
| РУ2 | 6 | 6708 | -335 | 3 | 809039 →* | – |
| РУ3 | 6 | 6708 | -335 | 3 | 1033016 →* | 13047 |
| СТУЗ | 6 | 6708 | -335 | 3 | 1005420 →* | 14851 |
| Среднее значение | | | | | | 13949 |
| Коэффициент вариации, % | | | | | | 9.1 |

- - образцы не доведены до разрушения

Образцы, упрочненные наномодифицированной клеевой композицией, в процессе усталостных испытаний не разрушились. По достижению количества циклов 1000000 было принято решения остановить ресурсные испытания и довести образцы РУ3 и СТУЗ до разрушения при повторной статике, образец РУ2 оставить в качестве наглядного демонстратора (рисунок 4.16). Разрушающие нагрузки при статическом растяжении образцов РУ3 и СТУЗ в среднем составили 13949кгс, что совпадает с разрушающей нагрузкой образцов СТУ1 и СТУ2 (см. таблица 4.5). Образцы СТУ1 и СТУ2 после испытаний на ресурс с последующим статическим растяжением представлены на рисунке 4.17.



Рисунок 4.14- Образцы после испытаний при статическом растяжении



а) вид сверху



б) вид сбоку

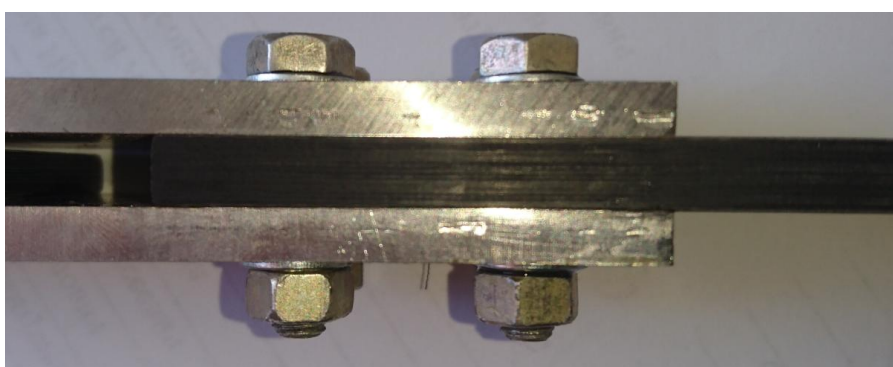
Рисунок 4.15.- Исходные образцы после испытаний на усталостную долговечность



Рисунок 4.16.- Образцы STU3 и PU3 после испытаний на ресурс с последующим статическим растяжением



а) вид сверху



б) вид сбоку

Рисунок 4.17.- Образец PU2 после усталостных испытаний, видимых повреждений не обнаружено

4.1 Разработка технологии ремонта низкоэнергетических ударных повреждений деталей из ПКМ

В современных условиях расширяется внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях летательных аппаратов. Обеспечение практического применения ПКМ в конструкциях эксплуатируемых самолетов связано, наряду с другими факторами, с обеспечением их ремонта в зависимости от уровня повреждений, разработки соответствующих методик и технологического оснащения для проведения ремонта. Отремонтированные детали конструкции из ПКМ должны выдерживать расчетные нагрузки в соответствии с требованиями АП-25.

Проведение ремонтно-восстановительных работ выполняется преимущественно по двум технологиям ремонта:

- с приклеенными ремонтными элементами;
- с клее-механическим присоединением ремонтных элементов (с металлическим крепежом).

Обе технологии ремонта имеют свои достоинства и недостатки с точки зрения прочностных характеристик, трудоемкости, массовой эффективности и требованиями одно- или двустороннего доступа к ремонтируемой зоне.

Клее-механический ремонт

При проведении клее-механического ремонта поврежденная зона удаляется механически, затем производится ремонт в виде установки накладок из металлического сплава (рисунок 4.18) либо из композиционного материала (рисунок 4.19) с последующим ее закреплением на ремонтируемой детали при помощи металлического крепежа (болты, заклепки). К достоинствам данного способа можно отнести сравнительно невысокую трудоемкость и возможность проведения при одностороннем доступе к поврежденной зоне.

Проведен экспериментальный анализ эффективности данного способа ремонта для трехстрингерных панелей. Конфигурация ремонта при этом аналогична ремонту конструкций из ПКМ, принятому в компании Airbus.



Рисунок 4.18.



Рисунок 4.19

Испытания отремонтированных образцов обшивки трехстрингерных панелей тонкостенной конструкции магистрального пассажирского самолета показали, что наличие зазоров между крепежными элементами и отверстиями в композиционной детали приводит к неодновременному включению в работу крепежных элементов и, как следствие, снижению жёсткости отремонтированной зоны по сравнению с исходной. На рисунке 4.20 построена эпюра действующих напряжений в отремонтированной зоне, полученная по результатам тензометрии при сжатии конструктивно-подобного образца. Видно, что в зоне ремонта действующие

напряжения существенно снижаются, что характеризует неполное включение ремонтной накладки и, соответственно, снижению уровню восстановления прочности отремонтированной детали.

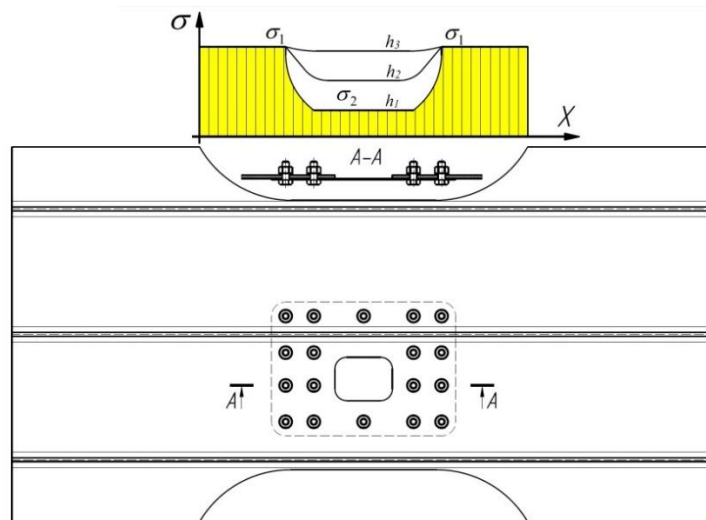


Рисунок 4.20- Эпюра действующих напряжений в отремонтированной зоне

Для обеспечения крепления ремонтирующего элемента в изделиях из ПКМ целесообразна плотная установка крепежных элементов (болты, болт-заклепки).

Ремонт с применением склеивания

Типовой ремонт с применением клеевых технологий включает послойное удаление материала из поврежденной зоны в виде обратного конуса с углом от 3° до 10° . Восстановление конструкционной целостности детали достигается за счет укладки и пропитки инфузионным связующим восстанавливающих слоев углеткани [121-122]. На рисунке 4.21 показан процесс и результат послойного удаления поврежденной области в детали из ПКМ.

По результатам экспериментальной оценки определено:

- данный тип ремонта обладает наибольшей массовой эффективностью;
- при сквозных повреждениях необходим двусторонний доступ к ремонтируемой зоне изделия;

- связан с высокой трудоемкостью;
- большой масштаб задействованной зоны детали при проведении ремонта (при размере повреждения 30 - 35 мм и толщине детали 3 мм – зона послойной выборки около 130 мм);
- не обладает постоянным качеством результатов, при неразрушающем контроле (УЗК) обнаруживаются значительные несплошности в ремонтируемой зоне - непрочней, отслоения и избыток связующего (площадь обнаруженных зон с внутренними дефектами составляет до 80% от отремонтированной зоны (рисунки 4.22-4.23), характер и масштаб данных дефектов имеет стохастический характер, что ведет к непредсказуемым разрушающим нагрузкам при эксплуатации;
- ремонт незначительно увеличивает массу детали из ПКМ.

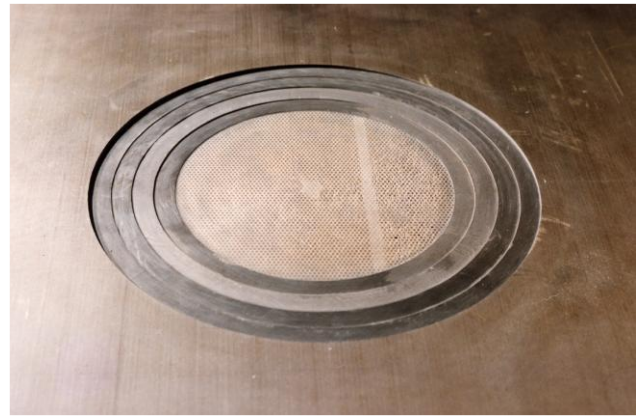


Рисунок 4.21 – Ремонт с применением клеевых технологий

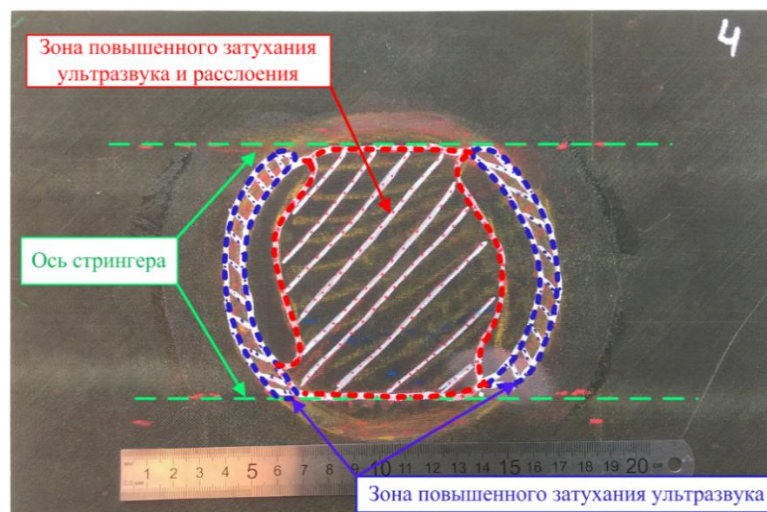


Рисунок 4.22 – Зона с внутренними дефектами в зоне ремонта, обнаруженная как в заводских условия, так и в лабораторных при испытаниях образцов

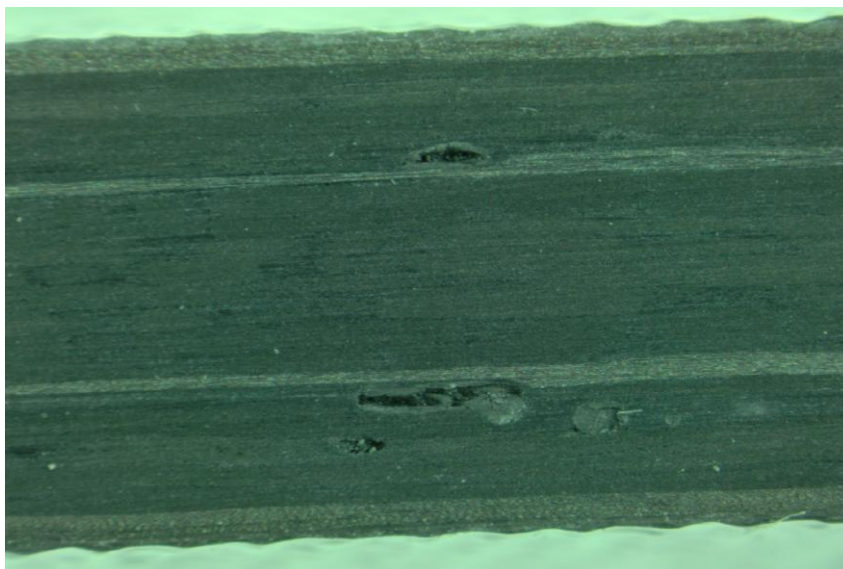


Рисунок 4.23 – Обнаруженные поры в зоне ремонта

Результаты экспериментального анализа ремонта с применением клеевых технологий позволяет сформулировать некоторые рекомендации для повышения его эффективности:

- целесообразно ультразвуковое воздействие при пропитке ремонтирующих слоев, для повышения адгезии, снижения пористости и более равномерной пропитки связующим. При подводе ультразвуковых высокочастотных механических колебаний к ремонтируемой зоне происходит увеличение площади сцепления клеевого слоя с поверхностью композита за счет звукокапиллярного эффекта, проявляющегося в виде возрастания глубины и скорости проникновения жидкого клея в капиллярные каналы и выдавливания менее плотных по сравнению со связующих воздушных пор [4].

4.3.1 Выбор типов низкоэнергетических ударных повреждений и их нанесение на конструктивно-подобные образцы из ПКМ

Для отработки и выбора альтернативных рациональных способов ремонта с односторонним доступом к ремонтируемому объекту целесообразно проводить исследования, согласно американского стандарта для определения остаточной прочности после нанесения удара ASTM 7137 и аналогичного европейского стандарта EN-638, на плоских модельных образцах размером 150x100мм с ударными повреждениями ($W=50$ Дж). На которых при нанесении ударных повреждений не происходит периферийного разрушения материала вследствие изгибных деформаций. Однако масштаб низкоэнергетических ударных повреждений составляет существенную величину (не менее 30-35мм в диаметре, по сравнению с габаритами образца – 100x150мм), что существенно снижает эффективность ремонта за счет масштабного фактора. В зависимости от масштабности повреждения по отношению к глобальным размерам образца $B=100$ мм и $L=150$ мм, процент восстановления поврежденного образца может варьироваться. Подробно о влиянии масштабного фактора изложено в работах Р. Нуизмера [8], в которых рассмотрены вопросы влияния фактора масштабности повреждения (d/B) на остаточную прочность образца.

Поэтому совместно со специалистами НИО-3 ЦАГИ для испытаний на сжатие были предложены новые габаритные размеры конструктивно-подобных подкрепленных пластин для испытаний 210x300мм (± 10 мм), на которые в условиях ЦАГИ возможно нанести ударные повреждения и провести испытания.

Энергия для нанесения ударных повреждений определена на уровне $W=50$ Дж. по следующим соображениям:

- исходя из статистики (Рисунок 4.24), анализ проведен в ЦАГИ и представлен в работе [НТО НИО-18 ЦАГИ, № № 6094, 2015 год]. Чем ниже энергия повреждения, тем выше вероятность возникновения таких повреждений. На рисунке 4.24 представлена кривая попадания в носок крыла за час полёта определенной энергии удара. Данные анализировались на 2014 год включительно.

Также стоит отметить, что характер зависимости вероятности повреждений от энергии удара аналогичен для всех элементов планера самолета;

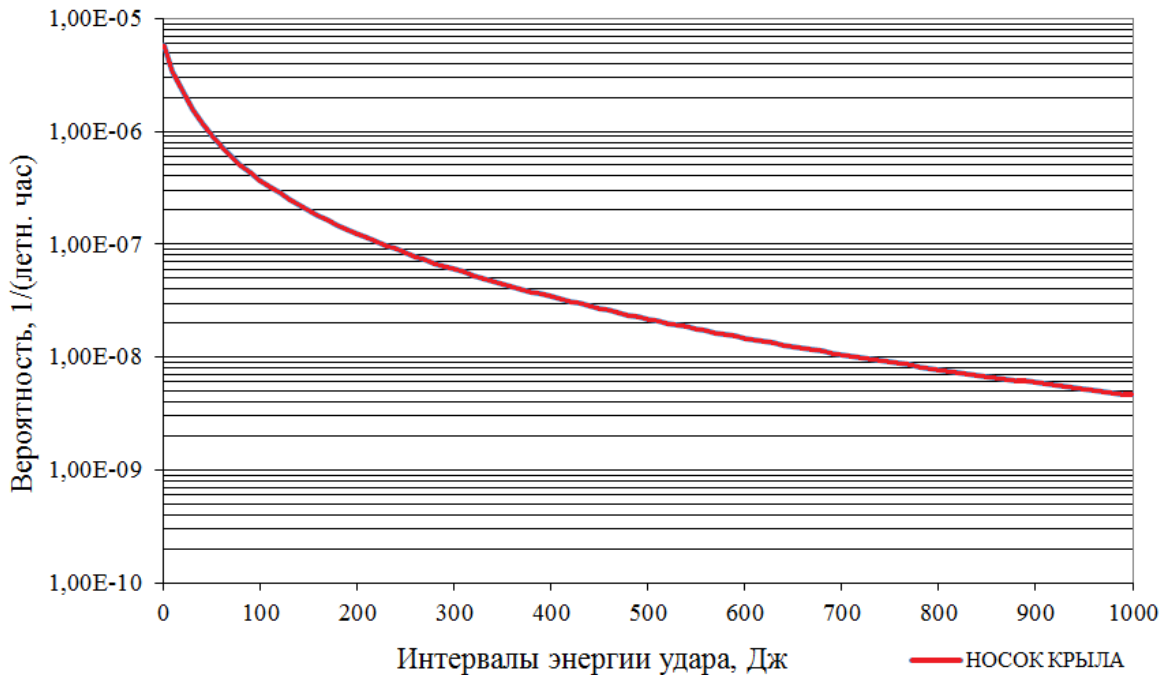


Рисунок 4.24 – Кривая вероятности попадания в носок крыла за час полёта определенной энергии удара, данные на 2014 г. Включительно

- результатов испытаний образцов на остаточную прочность после нанесения ударных повреждений (рисунок 4.25). Результаты получены в ФГУП «ЦАГИ» [123]. Остаточная прочность определялась для трех-стрингерных панелей с ударными повреждениями. Эксперимент показал, что в реальных конструкциях остаточная прочность мало зависит от энергии удара;
- определенных размеров внутренних разрушений в панелях из ПКМ, результаты получены во ФГУП «ЦАГИ».

С учетом вероятности ударного повреждения за час полёта (рисунок 4.24), остаточной прочности образцов из ПКМ (Рисунок 4.25) и экономических соображений целесообразно исследовать ремонт поврежденной зоны после нанесения низкоэнергетического ($W=50.0$ Дж) ударного повреждения.

Статистика ударных повреждений, собранная при проектировании авиационной техники в КБ «МИГ» показала, что 70% ударных повреждений на конструкциях из ПКМ имеют диаметр не более 30.0-35.0мм.

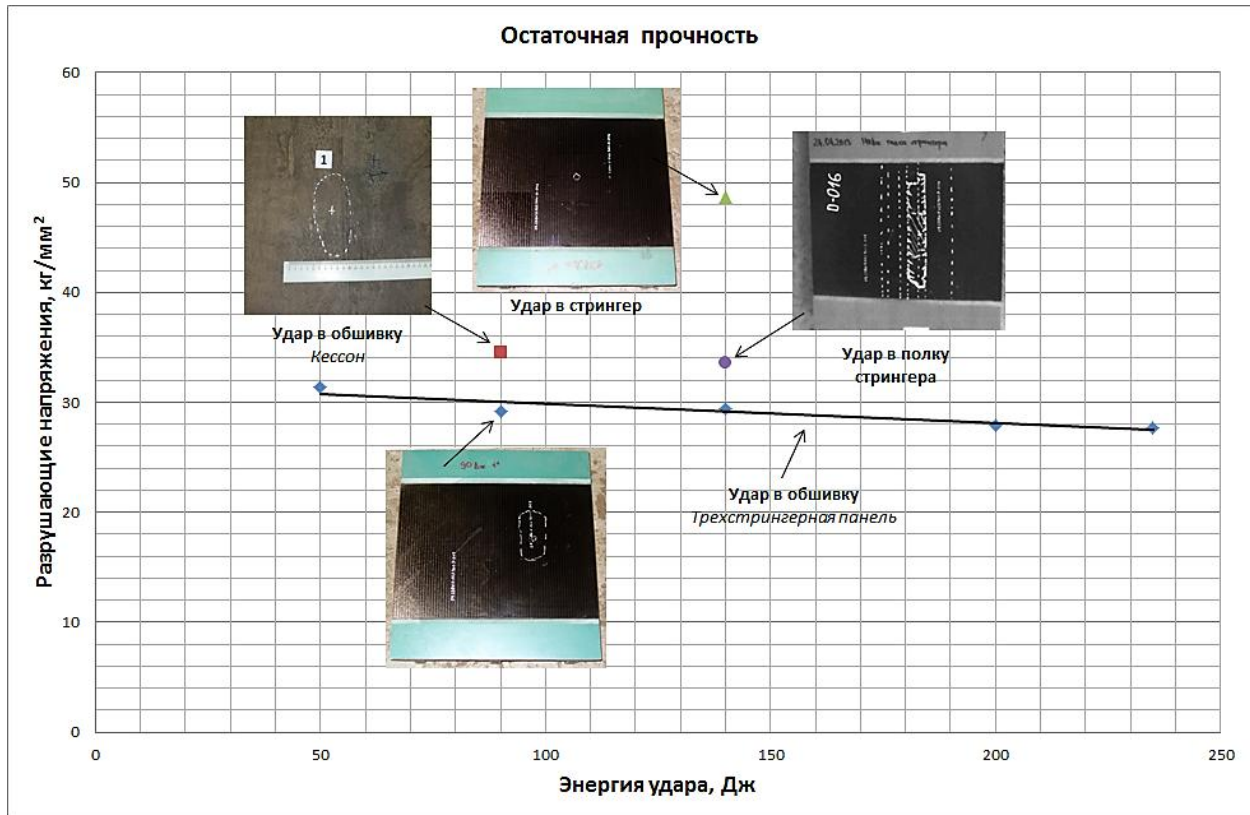


Рисунок 4.25 – Результаты испытаний на остаточную прочность

4.3.2 Выбор параметров конструктивно-подобных образцов для экспериментальных исследований остаточной прочности после ремонта

Для оценки прочности и устойчивости сжимаемых панелей планера, как в исходном состоянии, так и после ремонта, наиболее эффективно экспериментальные исследования проводить на трех-пролетных панелях, объединенных в кессон с помощью реальных нервюр и стенок, имитирующих стенки лонжерона. Подобные испытания позволяют обеспечить граничные условия в исследуемых сжатых зонах конструкции, близкие к реальным. Сжатая панель в данном случае рассматривается как «широкая». Конструкция нервюр, их жесткость и крепление к панели повторяет конструкцию крыла или оперения.

Коэффициент опирания соседних пролетов на нервюрах идентичен реальной конструкции.

В том случае, когда изготовление большого количества трех-пролетных кессонов с пятистрингерными панелями не представляется возможным, для оценки прочности, а также изучения характера и особенностей деформирования ПКМ в зоне ремонта при сжатии используются однопролетные трехстрингерные панели с уровнем разрушающих напряжений и напряжений местной потери устойчивости, если она допускается, совпадающими с многопролетными аналогами. При этом зона ремонта составляет не более 30% от площади, в плане, трехстрингерной панели. Конфигурация образца подкрепленной стрингерной панели представляет собой «приталенную» панель, в которой средняя рабочая зона со свободными боковыми краями служит для оценки прочности различного типа ремонтных вариантов конструкций из ПКМ и видов дефектов, влияющих на прочность: непроклей, ударное повреждение, посторонние включения, разрыв армирующего наполнителя, отслоение, расслоение и т.п. Изготовленные трехстрингерные панели для проведения опытных работ представлены на рисунке 4.26.

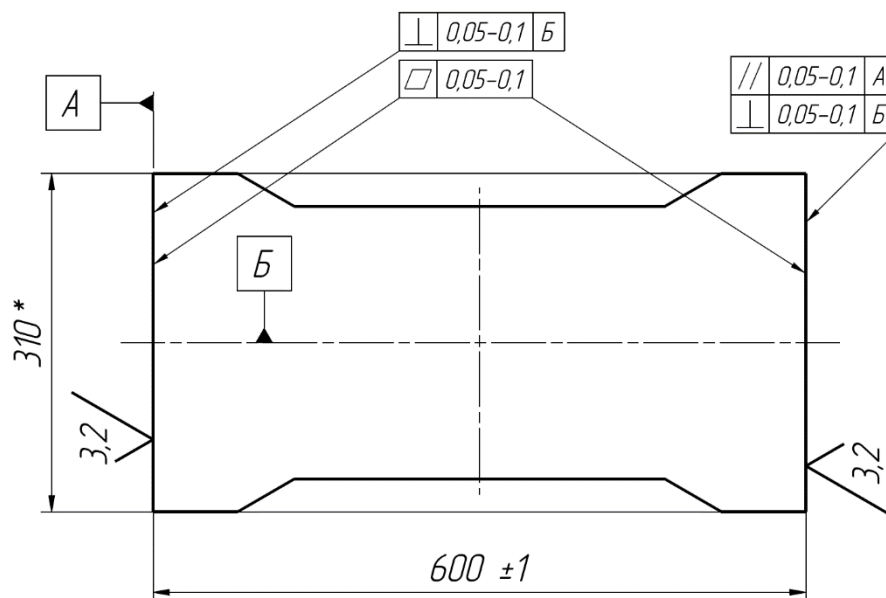


Рисунок 4.26- Схема с допусками на отклонения поверхностей трехстрингерной панели

Однако изготовление даже небольшого количества образцов подкрепленной, трехстрингерной панели для проведения предварительных экспериментальных исследований при выборе параметров ремонта представляется экономически не целесообразным. Для этой цели совместно со специалистами НИО-3 ЦАГИ для испытаний на сжатие были предложены габаритные размеры панелей для испытаний 210x300мм (± 10 мм), на которые в условиях ЦАГИ возможно нанести ударные повреждения и провести испытания по методике испытаний пластин и панелей из ПКМ на сжатие при шарнирном опирании вертикальных кромок (методика ЦАГИ 03-7535).

Конструктивно-подобные образцы для проведения экспериментальной оценки эффективности способов ремонта были изготовлены АО «ОНПП«Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, из материала ВКУ-25. Схема исследуемого образца представлена на рисунке 4.27. На рисунках 4.28 представлены фотоизображения образцов.

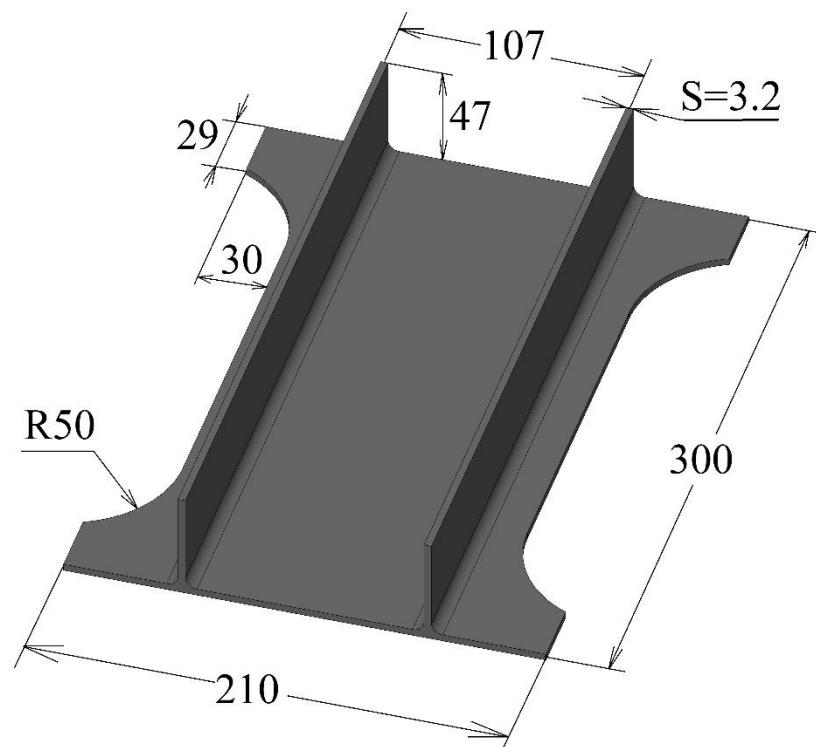
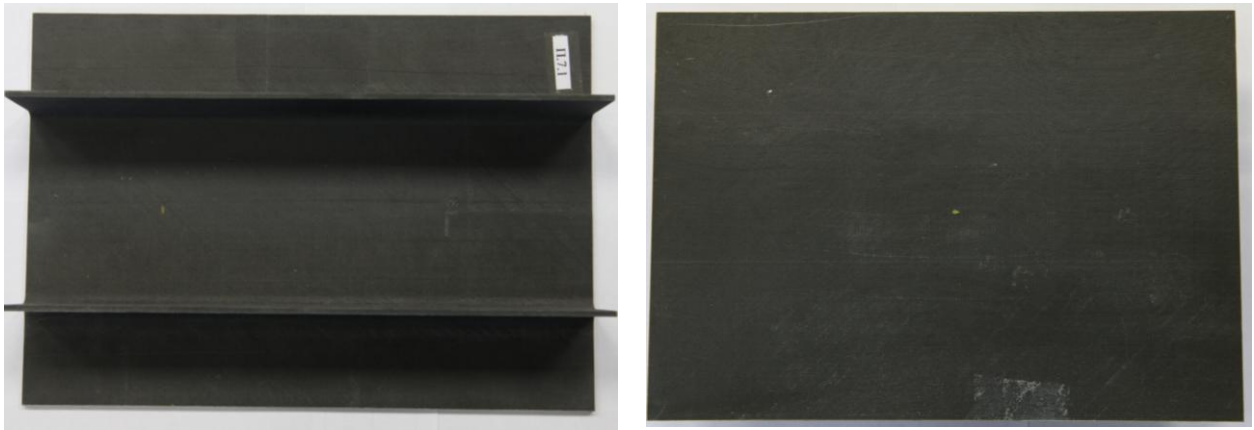


Рисунок 4.27- Схема конструктивно-подобного двустрингерного образца



а) Образец двухстрингерные панели (вид со стороны стрингеров) б) Образец двухстрингерные панели (вид со стороны обшивки)

Рисунок 4.28 Общий вид двухстрингерного образца

4.3.3 Определение рационального способа ремонта деталей из ПКМ

Представленная выше расчетно - экспериментальная оценка эффективности разнообразных способов ремонта низкоэнергетических ударных повреждений конструкций из ПКМ позволяет сделать выводы:

- применение в качестве восстанавливающего элемента приформованную заплату из слоев углеткани/угольной лены не позволяет восстановить жесткость в отремонтированной зоне, в том числе за счет внутренних дефектов и более низких механических характеристик связующего, используемого при проведении ремонтно-восстановительных работ;

- при применении механического крепления в деталях из ПКМ вследствие невозможности обеспечения плотных посадок крепежных элементов представляется сложным обеспечить достаточную жесткость крепления усиливающих накладок, что ведет к снижению жесткости в отремонтируемой зоне. Также асимметричная установка восстанавливающих накладок приводит к смещению оси жесткости и, как следствие, к преждевременной местной потере устойчивости.

В настоящей диссертационной работе в качестве альтернативного способа ремонта предлагается после выборки поврежденного материала установить в

освободившуюся зону цилиндрическую вставку из металлического материала, при этом необходимо установить восстанавливающий элемент без зазора. Этого можно достичь за счет установки его с нормированным натягом, который с одной стороны обеспечит плотное прилегание сопрягаемых деталей, а с другой- не вызовет существенные напряжения в примыкающей к ремонтирующей вставке зоне в ПКМ и, тем самым, не вызовет ослабления отремонтированной детали.

Натяг при установке ремонтирующего элемента можно осуществить за счет предварительного его охлаждения. Однако такой способ не допустим в деталях из ПКМ, т.к. охлаждение ниже -50°C по техническим требованиям не допускается. В предлагаемом способе рассматривается установка в выбранную механически поврежденную зону разрезное профилированное кольцо, равномерное прижатие которой осуществляется с помощью ввинчиваемой в нее металлической вставки, которая на внешней цилиндрической части выполнена с большим средним диаметром (резьба в натяг в соответствии с ОСТ ОСТ 1 00039-73). В процессе сборки внешнее разрезное кольцо разжимается, обеспечивая равномерное давление на края ремонтной детали по контуру удаленной зоны.

Профилированная форма разрезного кольца обеспечивает дополнительное усиление (подкрепление) наружных слоев армирующего наполнителя детали из ПКМ, примыкающих к металлическому распорному кольцу, что максимально снижает вероятность возникновения местных форм потери устойчивости при нагружении детали.

Ниже представлен оценочный расчет по определению рационального значения величины натяга.

Оценочный расчет по определению величины натяга

Ремонт с помощью цилиндрической вставки заключается в применении вставки, изготовленной из того же композита, из которого изготовлена панель или из другого отличного материала (сталь, алюминий, титан). При этом предполагается влияние натяга Δ в сопрягаемой зоне между вставкой и

ремонтируемой деталью на восстановление несущей способности отремонтированной панели (Рисунок 4.29), при этом натяг определяется из соотношения:

$\Delta = D - d$, где D – диаметр вставки, $d=36,5\text{мм}$ – диаметр отверстия выборки повреждения, при этом $D > d$.

В расчете конструктивных параметров не уделяется внимание вопросу выбора типа вставки (как соотносятся жесткостные характеристики вставки E, G, ν с аналогичными параметрами всей панели). Очевидно, что жесткостные характеристики вставки должны быть того же уровня (порядка), что и у ремонтируемого образца [10]. Следовательно, целесообразно вставку выполнять из титанового сплава. Однако в нашем случае мы остановились на имеющейся в наличии (сталь 12Х81Н10Т).

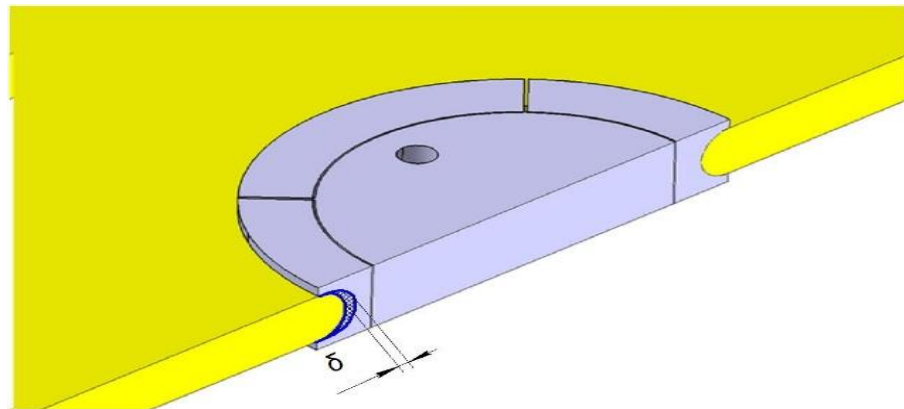


Рисунок 4.29 – Схема ремонта панели.

На основании характеристик упругости пакета, рассчитанных в разделе 4.1.1, была создана конечно-элементная (КЭ) модель ремонтируемого образца с выборкой зоны повреждения. Прессовая посадка δ моделировалась в виде взаимного перекрытия диаметров [мм] на цилиндрической поверхности соприкосновения вставки с панелью (Рисунок 4.28). Для каждого значения δ вычислялось соответствующее значение разрушающей нагрузки P [кгс]. Параметр δ варьировался в пределах [0...0,54мм]. За критерий разрушения композита были приняты три варианта критерия:

Критерий №1 (Мизеса-Губера) [6,8] (известная, как 4-ая энергетическая теория прочности) – для изотропных сплошных тел (т.к. данный критерий наиболее распространен среди инженеров-прочнистов, то целесообразно оценить по нему, чтобы видеть разницу по сравнению с критериями для анизотропных и ортотропных материалов):

$$A = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6 \cdot (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)}{\sigma_{11\Sigma}^2}}; \quad (4.5)$$

Критерий №2 (Цая-Хилла) [6,8]:

$$A = \sqrt{\frac{\sigma_{11}^2}{\sigma_{11\Sigma}^2} - \frac{\sigma_{11} \cdot \sigma_{22}}{\sigma_{11\Sigma}^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{\sigma_{22\Sigma}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{12\Sigma}^2}}; \quad (4.6)$$

Критерий №3 (Максимальных напряжений) [6,8]:

$$A = \max\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11\Sigma}}, \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22\Sigma}}, \frac{\tau_{12}}{\tau_{12\Sigma}}\right), \text{ где} \quad (4.7)$$

$\sigma_{11\Sigma}$, $\sigma_{22\Sigma}$, $\tau_{12\Sigma}$ – предельные прочностные характеристики, рассчитанные в разделе 4.1.1, а σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , τ_{12} , τ_{13} , τ_{23} – компоненты тензора напряжений, полученные в расчетной модели. Условием несущей способности панели является: $A \leq 1$.

На рисунке 4.30 представлена ортотропная КЭ-модель образца, выполненная в расчетной системе CATIA-ANALYSIS (CATIA V5R20 платформа P2 модуль Generative Structural Analysis), с граничными условиями нагружения δ и P .

Трение между вставкой и панелью отсутствует ($k_{тр.}=0$);

Дополнительный наномодифицированный клей, внедряемый при ремонте панели, не учитывается в расчетной модели.

Граничные условия – шарнирное закрепление по контуру панели, ограничивающий выход пластины из своей плоскости.

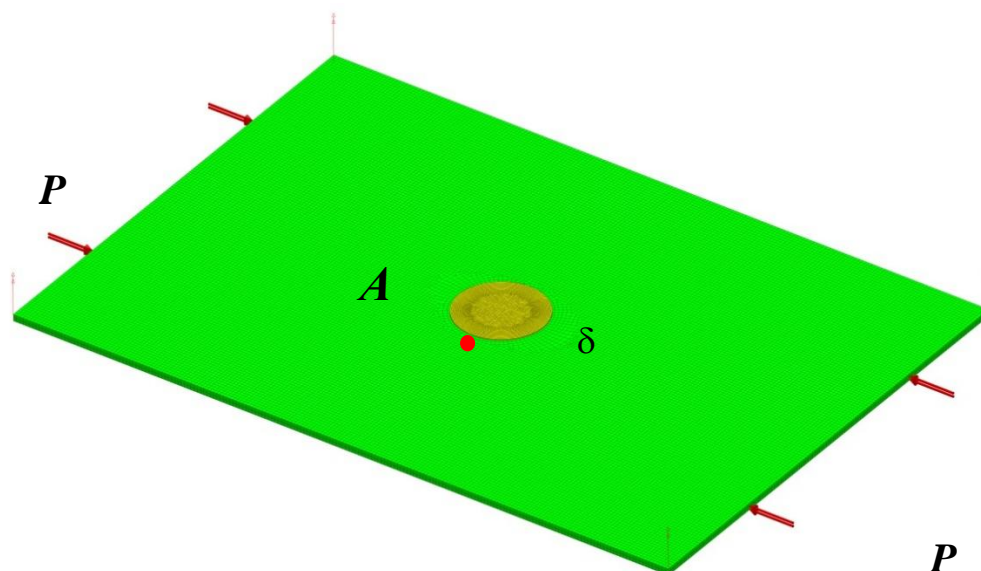


Рисунок 4.30 – КЭ-модель панели

В таблице 4.7 представлены результаты обоснования подробности дискретизации панели на конечные элементы по трем критериям (σ_{Mises} , t), в зависимости от количества элементов по толщине образца (N), где

σ_{Mises} – напряжение, отслеживаемое на удалении одного элемента вглубь от края отверстия вдоль оси симметрии панели (Рисунок 4.31),

T – время расчета.

Таблица 4.7 – значения напряжений в точке A и в максимально напряженной зоне (на кромке отверстия)

| N | $\sigma_{\text{Mises}}(A)$, [кгс/мм ²] | σ_{Mises} (макс), [кгс/мм ²] | T , [мин] |
|----------|--|---|----------------|
| 1 | 91 | 91 | 6,2 |
| 2 | 91,4 | 95,5 | 9,6 |
| 4 | 93,4 | 102 | 105 |

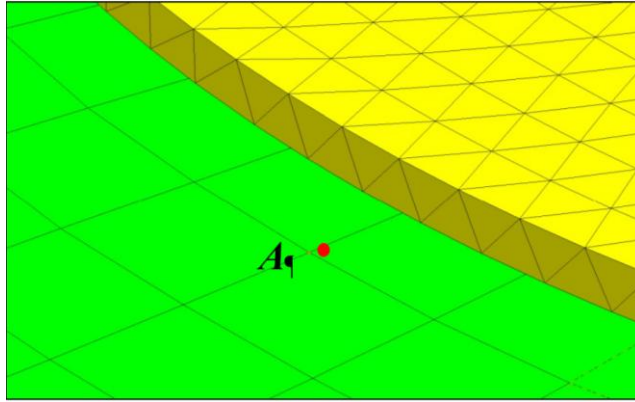


Рисунок 4.31 – узел отслеживания точности расчета

Из таблицы 4.7 очевидно, что рациональным вариантом сетки (с точки зрения показателя «точность по сходимости/время расчета») – вариант с двумя элементами по толщине панели ($N=2$). Хотя надо понимать, что возможно возникновение ошибки в расчете $(102/95,5-1) \cdot 100\% \sim 7\%$. Учитывая то, что точность расчета принимается на уровне инженерной – 10%, принимаем $N=2$.

На рисунке 4.32-4.33 представлены соответствующие результаты расчета: график зависимости максимальной разрушающей нагрузки P от δ и график зависимости максимального разрушающего напряжения по сечению «брутто» $\sigma_{\text{брутто}} = P/(H \cdot B)$ от δ , рассчитанные по различным критериям прочности.

Как видно из рисунков 4.32-4.33, результаты по критерию «Цая-Хилла» близки с результатами по критериям «Максимальных напряжений» и несколько расходятся с результатами по критерию «Мизеса-Губера». Расхождение между критерием «Максимальных напряжений» и критерием «Цая-Хилла» 5-10%. Поэтому для инженерных расчетов вполне пригодны как критерий «Цая-Хилла», так и критерий «Максимальных напряжений».

Расчет по критерию «Мизеса-Губера» также возможен, но в зоне допустимых значений $\delta < 0,1$ мм, для инженерной оценки допустимого диапазона значений (δ).

Из полученных результатов расчета (рисунки 4.32-4.33) можно определить рациональную зону допустимых значений прессовой посадки δ (0-0,1 мм), т.к. дальнейший рост этого значения ведет к резкому падению несущих нагрузок панели. Учитывая тот факт, что в композитных изделиях обеспечить назначенную

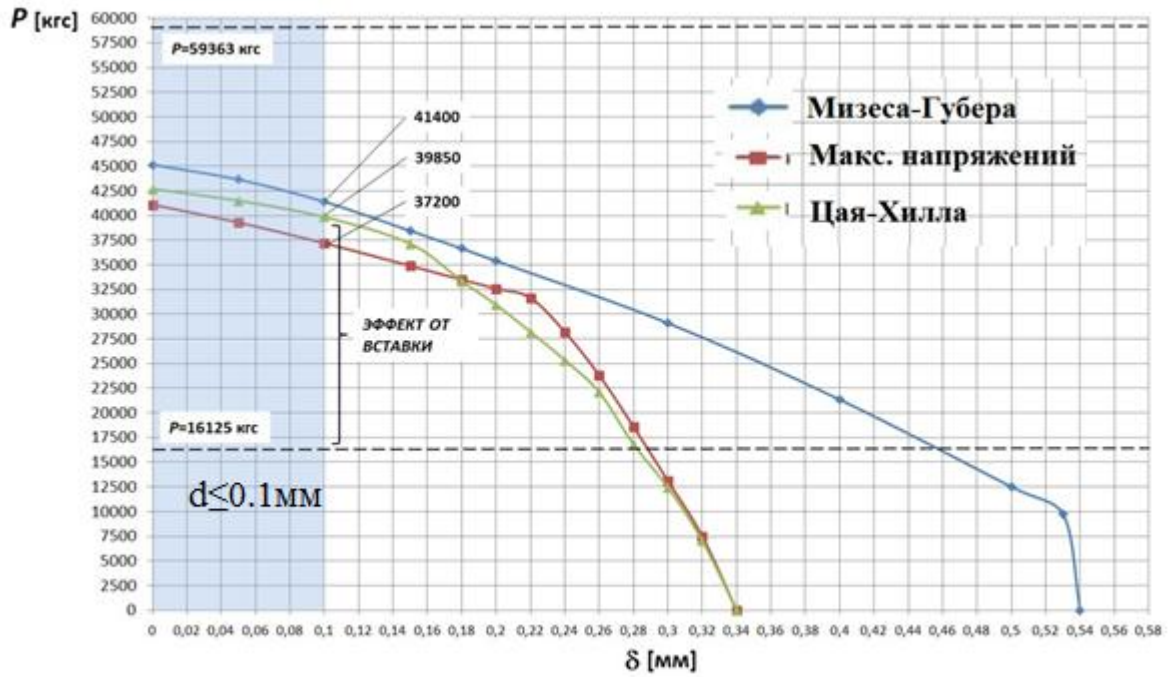
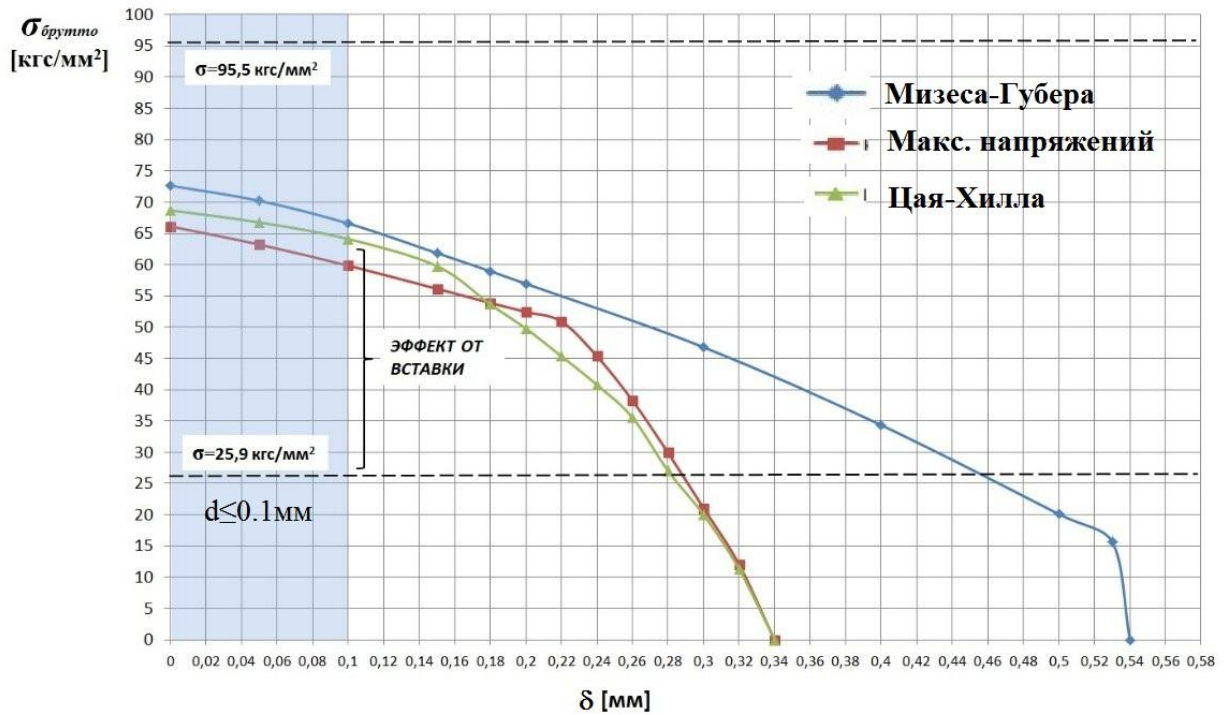
прессовую посадку достаточно проблематично (из-за неоднородности поверхности в зоне композита), то для определенности было порекомендовано значение прессовой посадки $\delta=0,1$ мм.

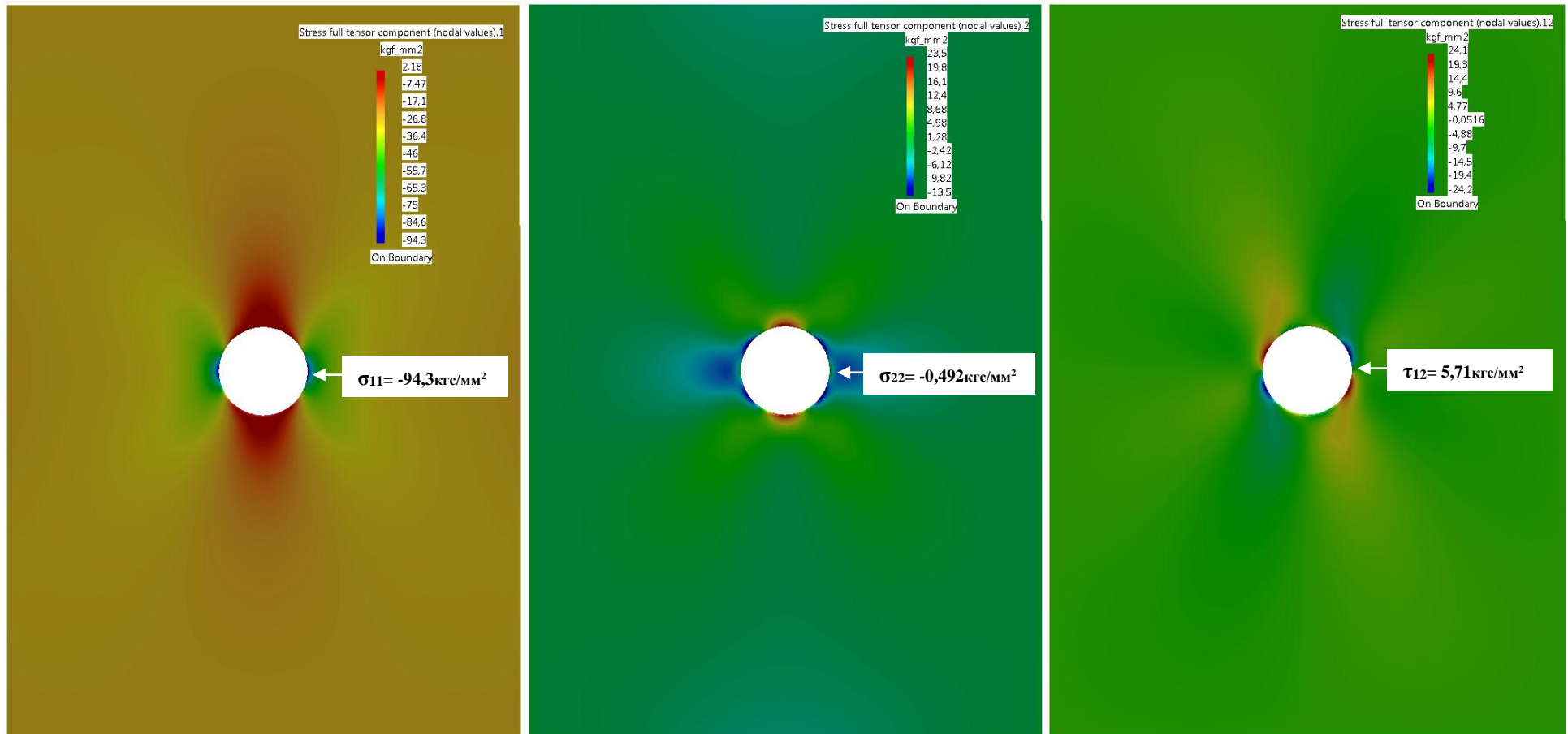
На рисунках 4.32-4.33 пунктирными линиями нанесен диапазон нагрузок от минимального значения $P=16125$ кгс ($\sigma_{\text{брутто}}=25,9$ кгс/мм²), соответствующего предельной разрушающей нагрузке панели без ремонтной вставки при наличии ослабляющего отверстия, до максимального значения, соответствующего максимальной несущей способности исходного (целой) панели ($P=\sigma_{11\Sigma} \cdot B \cdot H=95,5 \cdot 210 \cdot 2,96=59363$ кгс).

Анализ результатов расчета показывает, что с ростом прессовой посадки несущая способность падает в начале малой интенсивностью с постепенным нарастанием темпов падения. По-видимому это связано с большим вкладом контактных напряжений в общий уровень напряжений, возникающих также от внешней нагрузки P [кгс] и эффектом разгрузки (за счет снятия концентрации напряжений) с помощью ремонтной вставки.

На рисунке 4.34 представлены напряженные состояния в виде трех компонентов тензора напряжений (σ_{11} , σ_{22} , τ_{12}) от действия сжимающей нагрузки $P=16125$ кгс на панель с отверстием при отсутствии ремонтной вставки.

На рисунке 4.35 представлены три компоненты тензора напряжений (σ_{11} , σ_{22} , τ_{12}), при действии прессовой посадки $\delta=0,1$ мм и отсутствии внешней нагрузки ($P=0$).

Рисунок 4.32 – Результаты расчета в нагрузках P [кгс]Рисунок 4.33 – Результаты расчета в напряжениях $\sigma_{\text{брутто}}$ [кгс/мм²]



$$A = \sqrt{\frac{\sigma_{11}^2}{\sigma_{11\Sigma}^2} - \frac{\sigma_{11} \cdot \sigma_{22}}{\sigma_{11\Sigma}^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{\sigma_{22\Sigma}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{12\Sigma}^2}} = \sqrt{\frac{(-94,3)^2}{(-95,5)^2} - \frac{-94,3 \cdot (-0,492)}{(-95,5)^2} + \frac{(-0,492)^2}{(-67,2)^2} + \frac{5,71^2}{32,7^2}} = 1$$

Рисунок 4.34 – Результаты расчета панели без вставки при $P=16125$ кгс

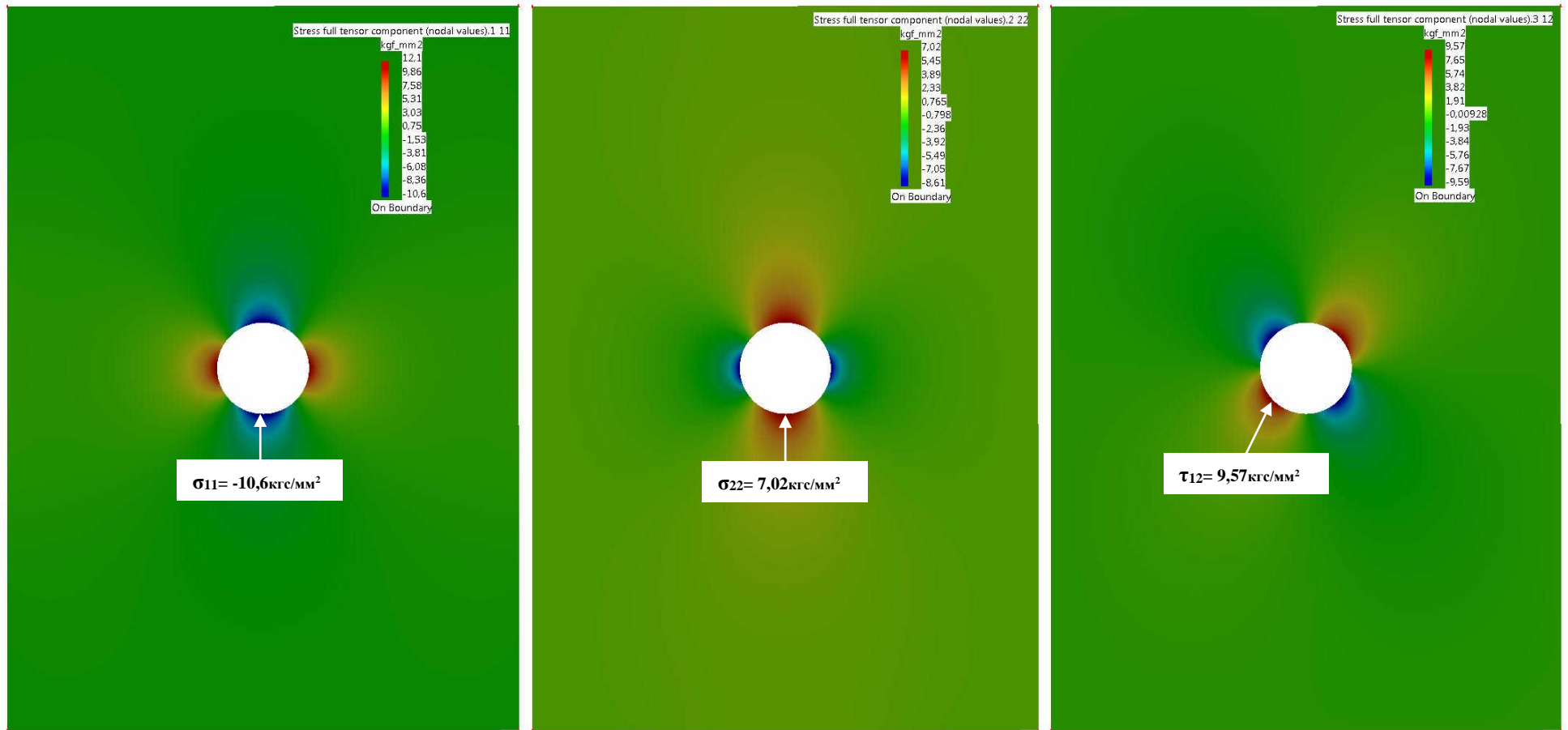


Рисунок 4.35 – Результаты расчета панели без вставки при $\delta=0,1\text{ мм}$, $P=0$

Поверочный расчет по критериям прочности (4.5-4.7), показал, что предельная, допустимая величина натяга, под воздействием сжимающей нагрузки P , определяется равной $\delta=0,1$ мм:

Поверочный расчет по критерию «Мизеса-Губера» $P=41400$ кгс и $\delta=0,1$ мм:

$$A = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6 \cdot (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)}{\sigma_{11\Sigma}^2}} = \quad (4.8)$$

$$= \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6 \cdot (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)]}}{\sigma_{11\Sigma}} = \frac{95,5}{95,5} = 1$$

Поверочный расчет по критерию «Цая-Хилла» $P=39850$ кгс и $\delta=0,1$ мм:

$$A = \sqrt{\frac{\sigma_{11}^2}{\sigma_{11\Sigma}^2} - \frac{\sigma_{11} \cdot \sigma_{22}}{\sigma_{11\Sigma}^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{\sigma_{22\Sigma}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{\tau_{12\Sigma}^2}} = \sqrt{\frac{(-102)^2}{(-95,5)^2} - \frac{-102 \cdot (-18,4)}{(-95,5)^2} + \frac{(-18,4)^2}{(-67,2)^2} + \frac{(0,247)^2}{(32,7)^2}} = 1,01 \quad (4.9)$$

Поверочный расчет по критерию «Максимальных напряжений» $P=37200$ кгс и $\delta=0,1$ мм:

$$A = \max\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11\Sigma}}; \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22\Sigma}}; \frac{\tau_{12}}{\tau_{12\Sigma}}\right) = \max\left(\frac{-95,5}{-95,5}; \frac{-16,7}{-67,2}; \frac{24,1}{32,7}\right) = \max(1; 0,47; 0,13) = 1 \quad (4.10)$$

В формулах 4.8-4.10 компоненты напряжения подставлены с учетом знака на сжатие – .

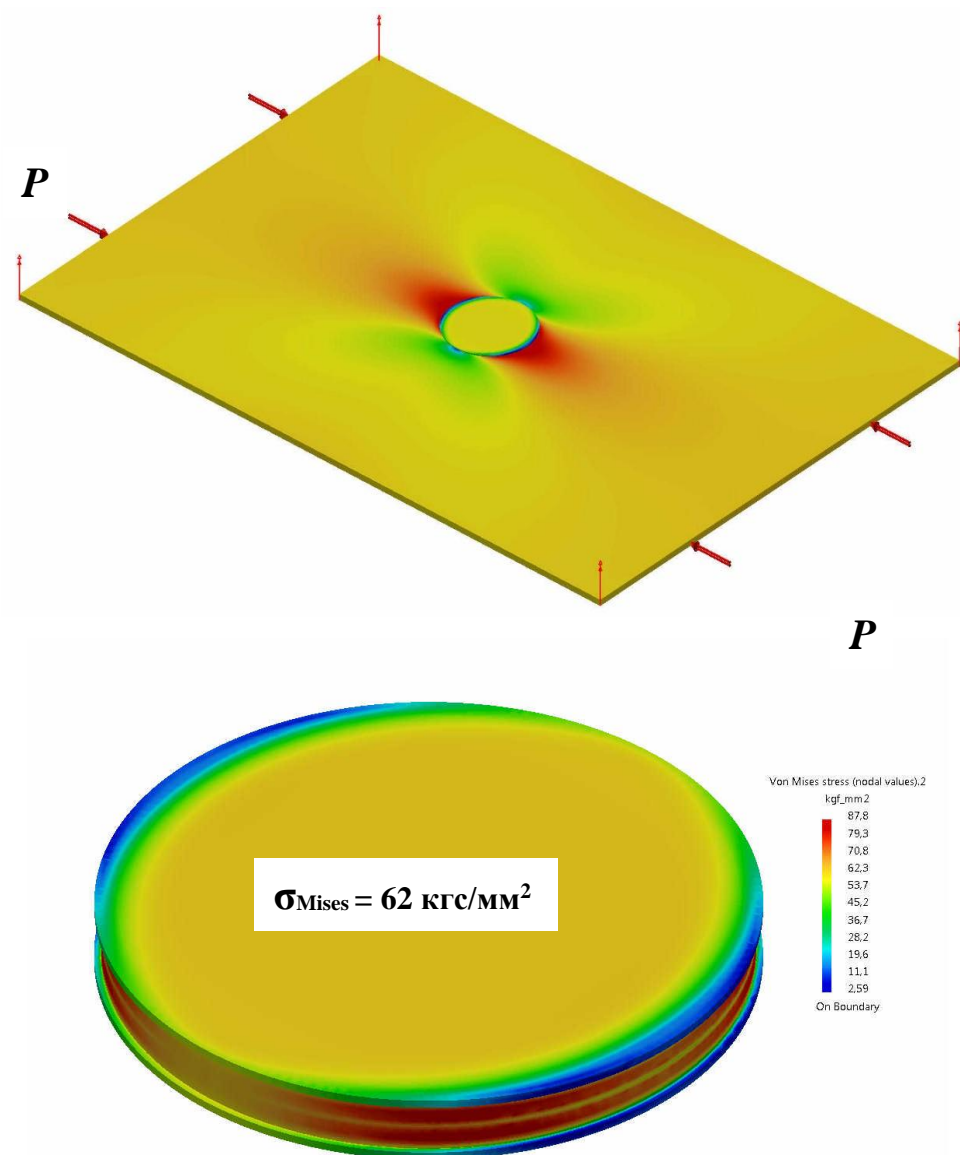


Рисунок 4.36 – Напряженное состояние в ремонтной вставке по Мизесу,
 $\delta=0,1\text{ мм}$, $P=39850\text{ кгс}$

На рисунке 4.36 представлено напряженное состояние исследуемой панели при $\delta=0,1\text{ мм}$ и разрушающей нагрузке $P=39850\text{ кгс}$.

Запас прочности по ремонтной вставке, выполненной из стали марки 12X18H10T:

$$\eta = \frac{k \cdot \sigma_B}{\sigma_{Mises}} = \frac{1,3 \cdot 49}{62} = 1,03, \text{ где}$$

$\sigma_B = 49\text{ кгс/мм}^2$ – предел прочности стали 12X18H10T,

$k=1,3$ – коэффициент, учитывающий рост предельной разрушающей характеристики на сжатие [124].

На графике (рисунок 4.33) 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 обусловливаемой натягом концентрации напряжений. Они задаются зависимостью, полученной В.Б Литвиновым [16]:

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

Где: $K = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$, $\sigma_r = \frac{2}{3} K \cos \left(\omega + \frac{\pi}{6} \right)$, $\sigma_\theta = \frac{2}{3} K \cos \left(\omega - \frac{\pi}{6} \right)$, G-модуль сдвига, ω - функция

характеризующая положение точки на эллипсе Мизеса, $\omega(R) = \bar{\omega}$, $k=1/3E$, σ_s - пределы текучести нормальных напряжений, R – радиус вставки.

На рисунке 4.37 показана эпюра напряжений около отверстия при постановке закладной детали с натягом, при $U_r=0.5\%$ (отношение δ/R), что соответствует $\delta = 0.4-0.5$ мм.

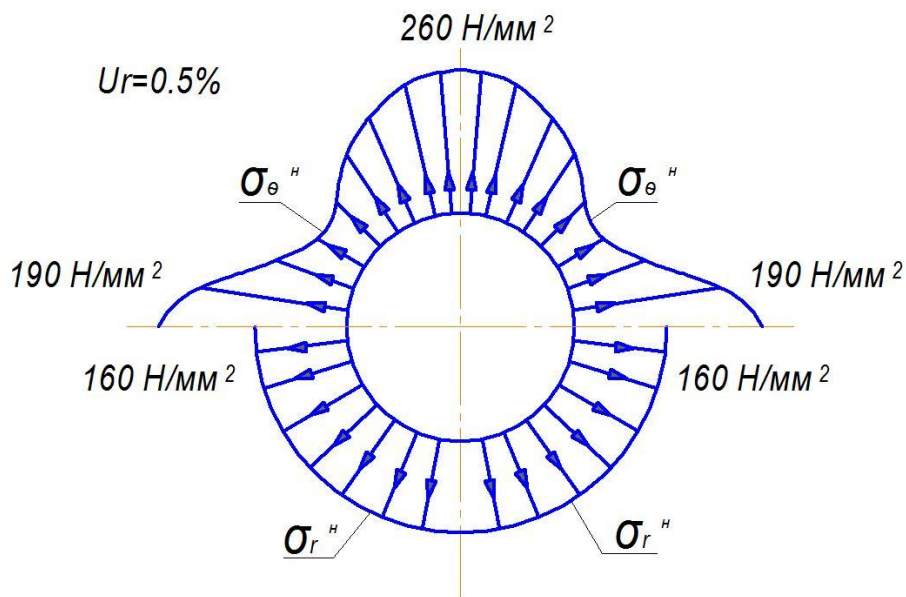


Рисунок 4.37 Влияние натяга на напряжения около отверстия [16]

4.3.4 Результаты испытаний отремонтированных панелей

Для отработки способов ремонта целесообразно проводить исследования на плоских модельных образцах размером 150x100мм с ударными повреждениями ($W=50$ Дж). При нанесении ударных повреждений на которые не происходит периферийного разрушения материала вследствие изгибных деформаций. Однако размер низкоэнергетических ударных повреждений составляет не менее 30-35мм в диаметре, что существенно снижает определение эффективности ремонта за счет масштабного фактора. В зависимости от масштабности повреждения по отношению к глобальным размерам образца B и L процент восстановления поврежденного образца может варьироваться. Подробно о влиянии масштабного фактора изложено в работах Р. Нуизмера [8], показано влияние фактора масштабности повреждения (d/B) на остаточную прочность образца.

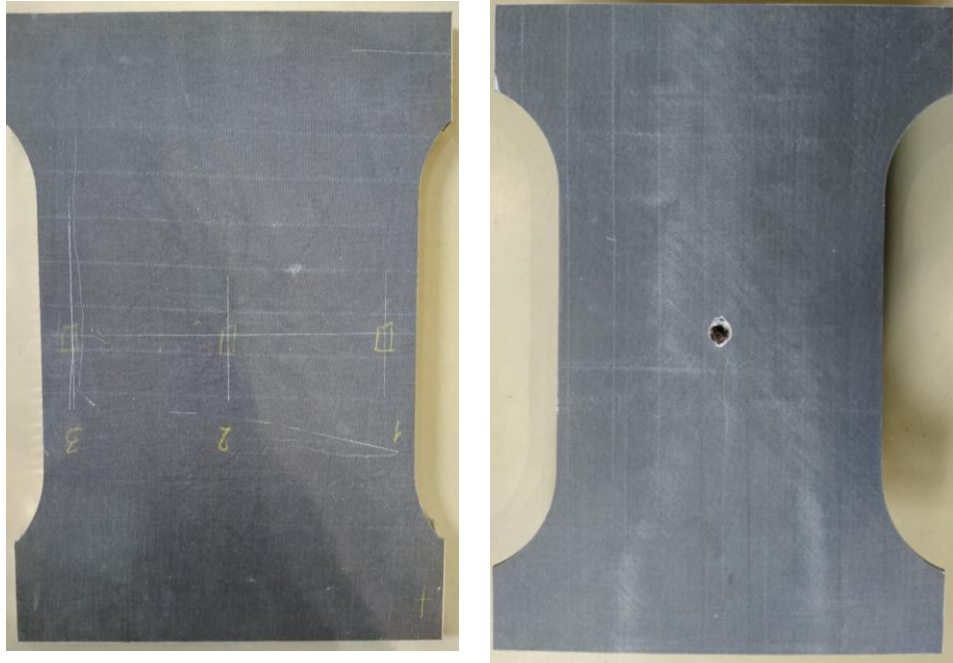
Поэтому совместно со специалистами НИО-3 ЦАГИ для испытаний на сжатие пластин с повреждениями и отремонтированные были определены размеры образцов для испытаний 210x300мм (± 10 мм), на которые в условиях ЦАГИ возможно нанести ударные повреждения и провести испытания (рисунок 4.36).

В разделе 4.3.1 было установлено, что низкоэнергетические ударные повреждения энергией 50.0Дж приводят к глубоким повреждениям, с растрескиванием связующего и разрывам волокон наполнителя. Целесообразно такие повреждения полностью удалять. На рисунках 4.39 представлены образцы с механически удаленной поврежденной зоной в виде цилиндра, предназначенные для последующего ремонта.

Среди исследуемых образцов представлены:

- исходные образцы;
- образцы с ударными повреждениями;
- образцы с удаленной поврежденной зоной;
- образцы с произведенным ремонтом.

Изображения образцов до проведения прочностных испытаний представлены на рисунках 4.38-4.40.



а) СТ-И исходная

б) СТ-УП с ударным
повреждением

Рисунок 4.38 Фотоизображения всех типов двухстрингерных образцов



Рисунок 4.39 – Образцы с механически удаленной поврежденной зоной



А) вид со стороны обшивки



Б) вид со стороны стрингеров

Рисунок 4.40 – Образцы с произведенным ремонтом

4.3.5 Методика испытаний панелей на сжатие

По методике испытаний пластин и панелей из ПКМ на сжатие при шарнирном опирании вертикальных кромок (методика ЦАГИ 03-7535) испытания проводятся в приспособлении, приведенном на рисунке 4.41.

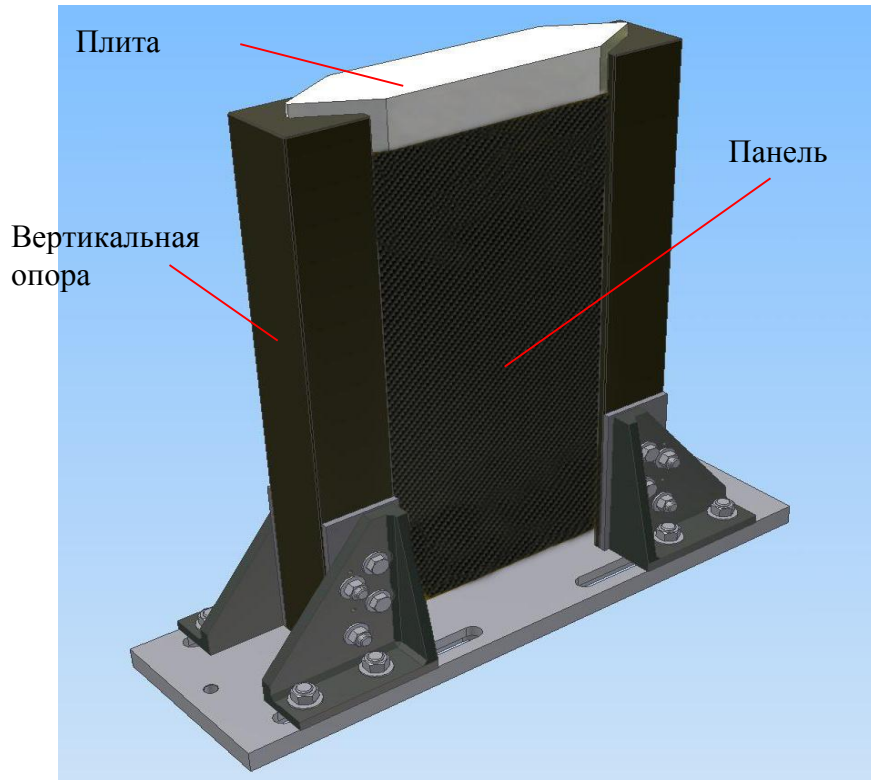


Рисунок 4.41 – Общий вид приспособления для испытания на сжатие

Пластины закрепляются в специальном приспособлении, установленном между траверсами машины, позволяющем шарнирно опирать вертикальные кромки. Нагруженные кромки с непараллельностью 0,05 мм. оперты в торец. В связи с чем были определены жесткие рамки допусков на непараллельность и неплоскость торцевых поверхностей изготавливаемых пластин (рисунок 4.42). В случае испытаний двухстрингерных панелей дополнительно применялось приспособление для принудительного заневоливания свободных краев стрингеров п-образной алюминиевой оснасткой рисунок 4.43. Данная оснастка позволяет максимально нагрузить рабочую область панели и избежать разрушения образца вследствие потери устойчивости стрингера при малых напряжениях σ потери устойчивости стрингера $\sim 11-12 \text{ кгс/мм}^2$.

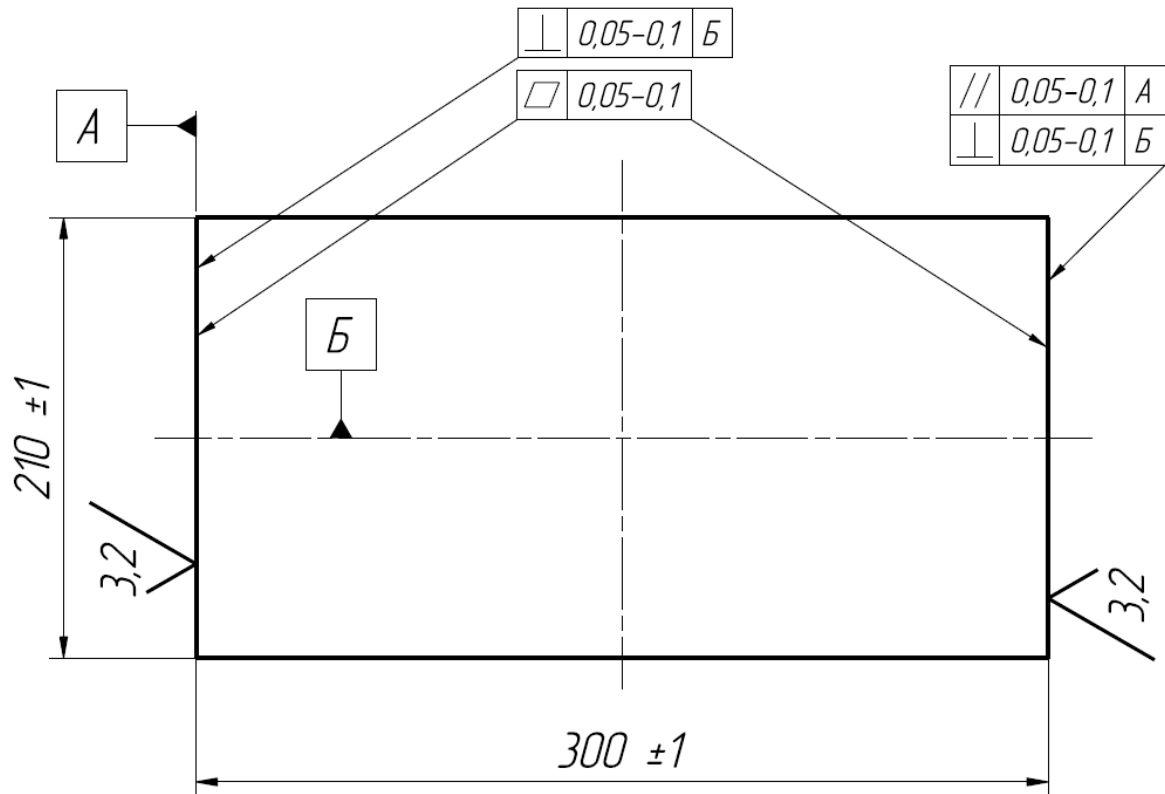


Рисунок 4.42 - Рамки допусков на непараллельность и неплоскость торцевых поверхностей изготавливаемых пластин

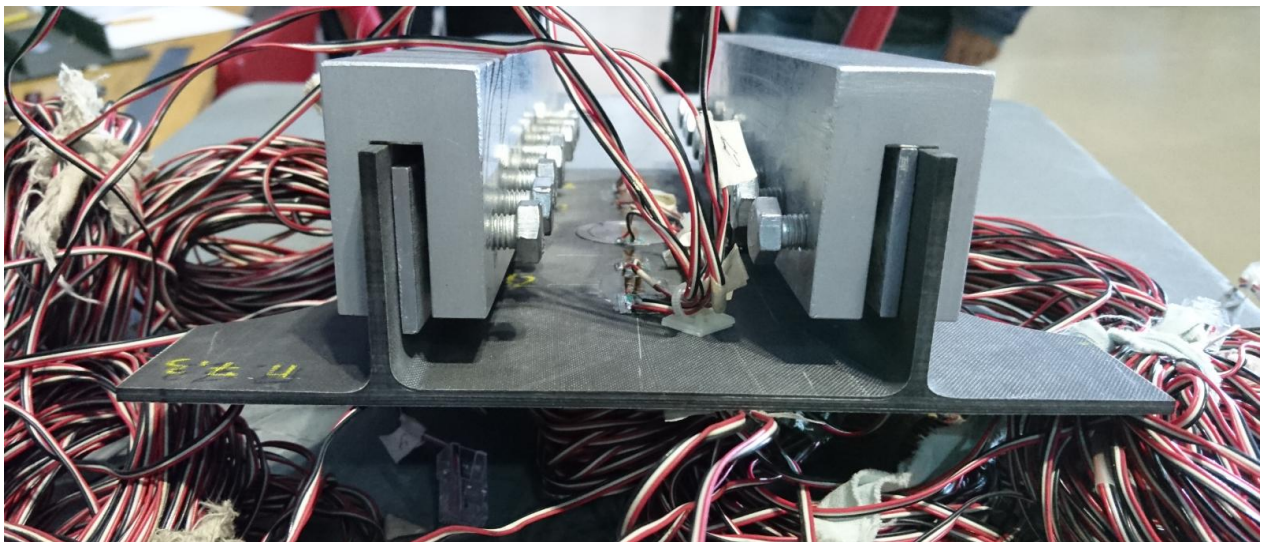


Рисунок 4.43 - Изображение двухстрингерной панели с оснасткой, не допускающей потерю устойчивости стрингера.

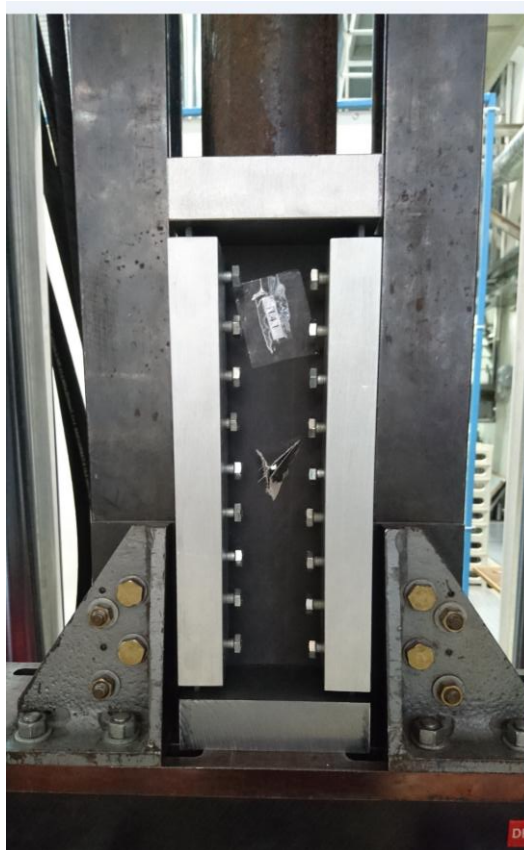


Рисунок 4.44 - Изображение двухстрингерной панели П.4.1 с оснасткой, не допускающей потерю устойчивости стрингера. Панель установлена в испытательной машине

После установки пластины к ней через жёсткую, свободно скользящую в вертикальных опорах, плиту прикладывается дискретно увеличивающаяся нагрузка. При этом пластина опирается следующим образом: концевые части экспериментальной пластины шарнирно опирались в вертикальных стенках; средняя часть пластины (рабочая зона) оставалась свободной. Пластина, установленная в приспособления для испытания на сжатие, представлена на рисунке 4.44.

В процессе испытаний производится замер сближения торцов пластин по перемещению захватов испытательной машины. Процесс нагружения может быть непрерывным или с остановками для визуального осмотра деформированного состояния пластин. Панель испытывается до разрушения или исчерпания несущей способности.

4.3.6 Анализ результатов испытаний панелей на сжатие

В таблицах 4.8-4.9 представлены результаты испытаний образцов на сжатие, взятые из протоколов испытаний. Там же на рисунках представлены формы разрушений соответствующих образцов, где контурами выделены локальные зоны разрушения. Все образцы разрушились в рабочей зоне. Для измерения деформаций на одну из панелей каждого типа были установлены тензодатчики. Схема установки тензометрии и результаты представлена на рисунках 4.45-4.46.

Результаты испытаний двухстрингерных панелей

Исходные образцы разрушились при напряжениях $\sigma=36.64-39.96 \text{ кгс/мм}^2$, разрушение происходит вследствие местной потери устойчивости обшивки между стрингерами; начало потери устойчивости происходит при напряжениях $\sigma=27.5 \text{ кгс/мм}^2$.

Образцы с ударными повреждениями разрушились при напряжениях $\sigma=23.96-28.01 \text{ кгс/мм}^2$ снижение прочности образца с ударным повреждением 50Дж, бойком 10.0мм составило около 30%.

Образцы с двухсторонним ремонтом показали более высокие разрушающие напряжения по сравнению с исходными образцами $\sigma=38,4-41.23 \text{ кгс/мм}^2$. Однако, из анализа результатов тензометрии, можно сделать вывод, что ремонт в виде послойного восстановления целостности образца приводит к уменьшению жесткости и, как следствие, местная потеря устойчивости отремонтированной обшивки между стрингерами происходит на меньших по сравнению с исходным состоянием напряжениях $\sigma=25,0 \text{ кгс/мм}^2$.

Образцы с клее-механическим ремонтом по технологии НПК ЦАГИ разрушились при напряжениях $\sigma=31.42-31.49 \text{ кгс/мм}^2$ вследствие местной потери устойчивости отремонтированной обшивки между стрингерами. Местная потеря устойчивости отремонтированной зоны обшивки происходит при напряжениях $\sigma=28,5-29,7 \text{ кгс/мм}^2$. Небольшой разброс разрушающих напряжений показывает, что клее-механический ремонт с применением прессовой посадки металлического элемента обладает высоким качеством.

Таблица 4.8 Результаты испытаний при сжатии двухстринговых панелей

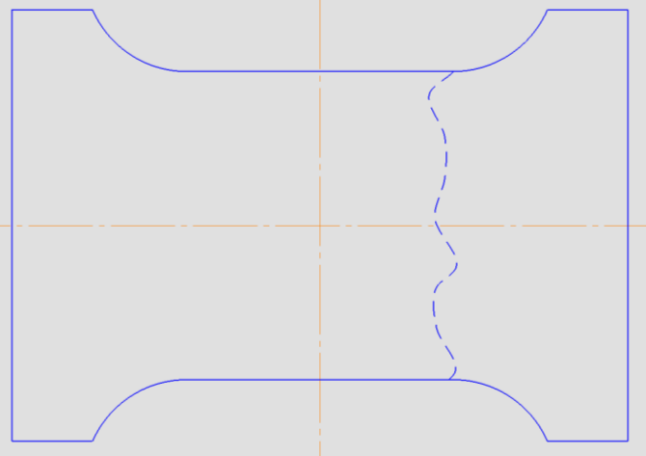
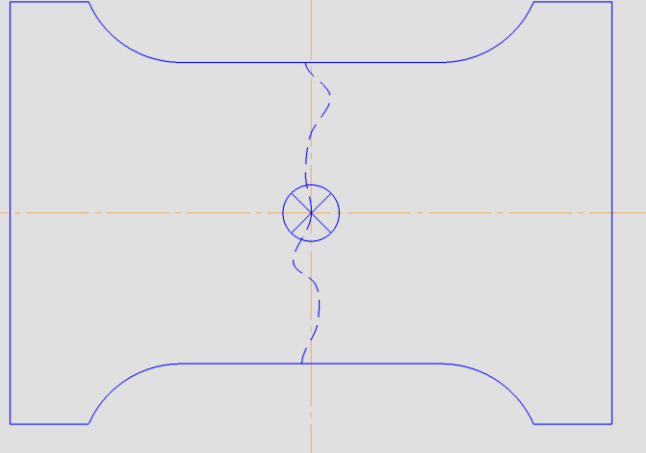
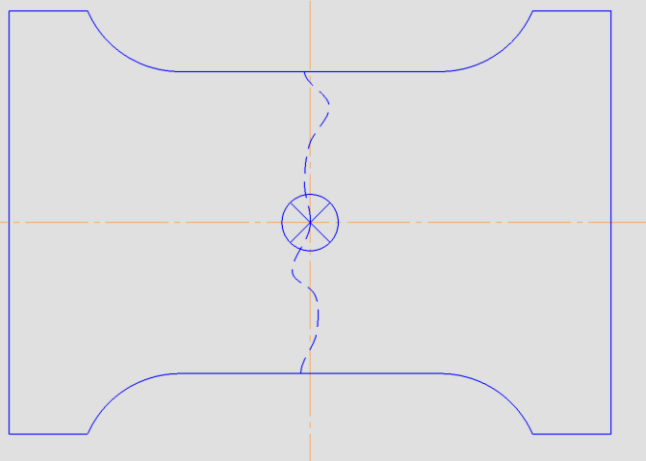
| Маркировка | Состояние | № панели | Разр. Кгс нач. разр. | Разр. Кгс разр | $\sigma_{раз}$ кгс/мм ² | характер разрушения | примечание |
|------------|---|----------|----------------------|----------------|------------------------------------|---|--|
| СТ-И | исходные | 1 | 27300 | 28946 | 36.64 | Разрушение на границе рабочей зоны |  |
| | | 2 | | 30436 | 38,53 | | |
| | | 3 | | 31566 | 39,96 | | |
| СТ-УП | Образец с ударным повреждением обшивки бойком D=10 мм E=50 Дж | 1 | | 22131 | 28,01 | Разрушение по зоне ударного повреждения |  |
| | | 2 | 13000 | 18930 | 23,96 | | |
| | | 3 | | 21601 | 27,34 | | |
| | | 4 | | 20765 | 26,28 | | |

Таблица 4.9 Результаты испытаний при сжатии двухстрингерных панелей с ремонтом по технологии НПК ЦАГИ

| Маркировка | Состояние | № панели | Разр. Кг нач. разр. | Разр. Кгс разр | $\sigma_{раз}$ кгс/мм ² | характер разрушения | примечание |
|------------|--|----------|---------------------|----------------|------------------------------------|----------------------------|---|
| П.7 | клее-механический ремонт по технологии НПК ФГУП «ЦАГИ» | 1 | 21,6 | 24880 | 31,49 | Разрушение по зоне ремонта |  |
| | | 2 | | 24820 | 31,42 | | |
| | | 3 | 23,5 | 24860 | 31,47 | | |

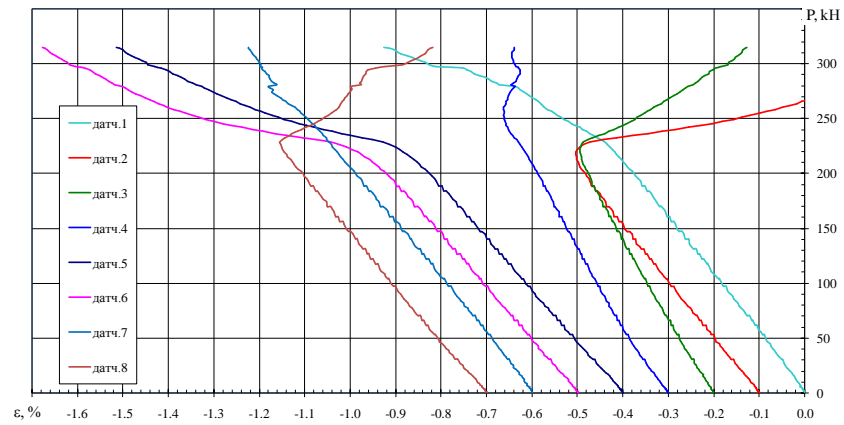


Диаграмма деформирования панели СТ-И.3 в исх.
состоянии $P_{\max}=315,26$ кН

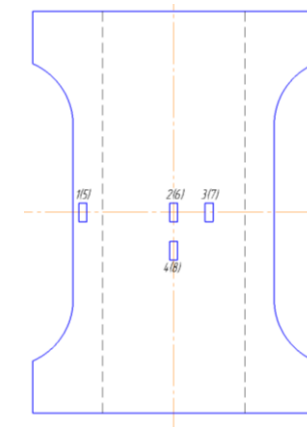


Схема установки тензометрии, образец СТ-И.3

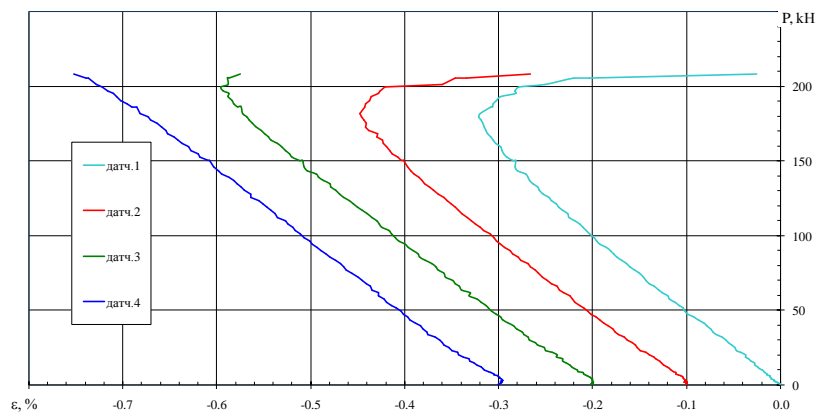


Диаграмма деформирования панели СТ-У.3 после удара $P_{\max}=208,17$ кН

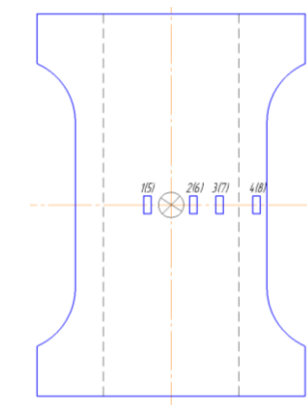


Схема установки тензометрии, образец СТ-У.3

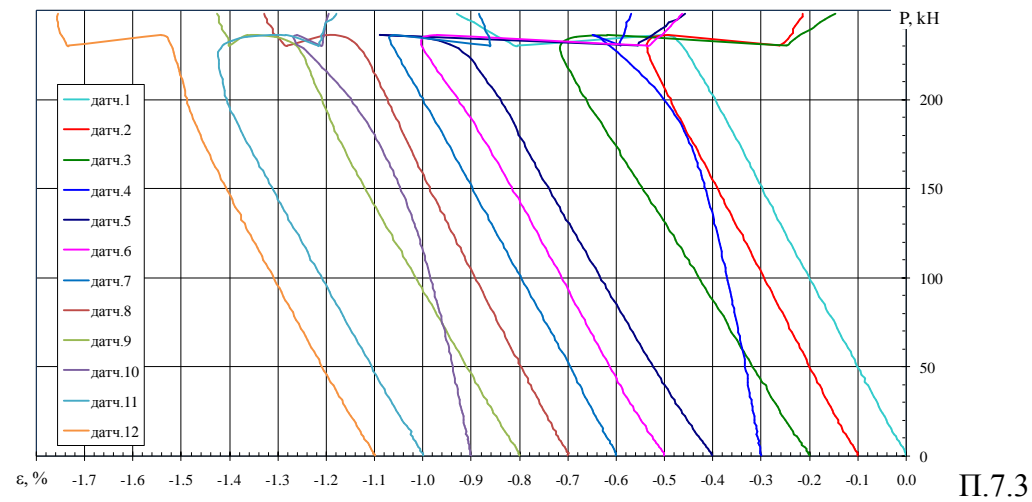
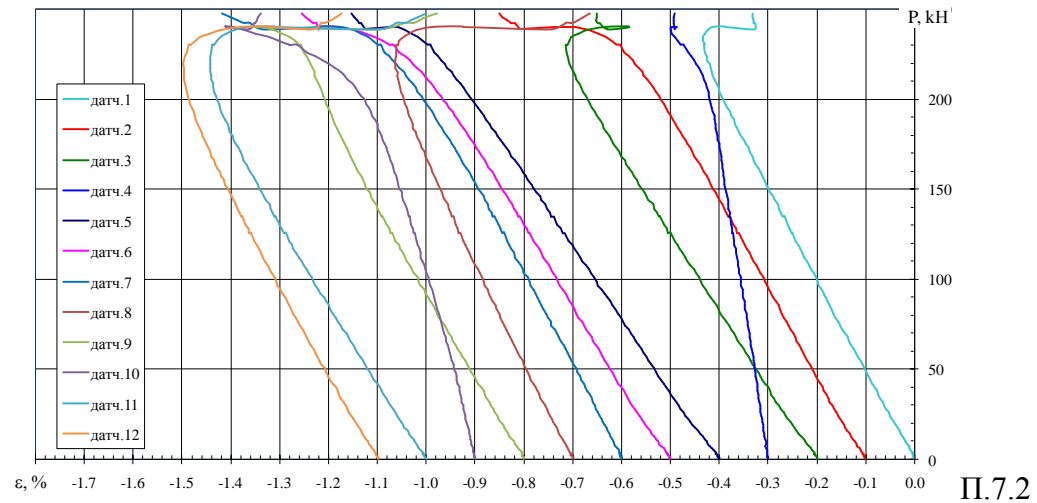


Диаграмма деформ. панели П.7.2/П.7.3 (двухстрингерная с мет. заглушкой)
 $P_{\max}=248,2\text{кН}/248,6\text{кН}$

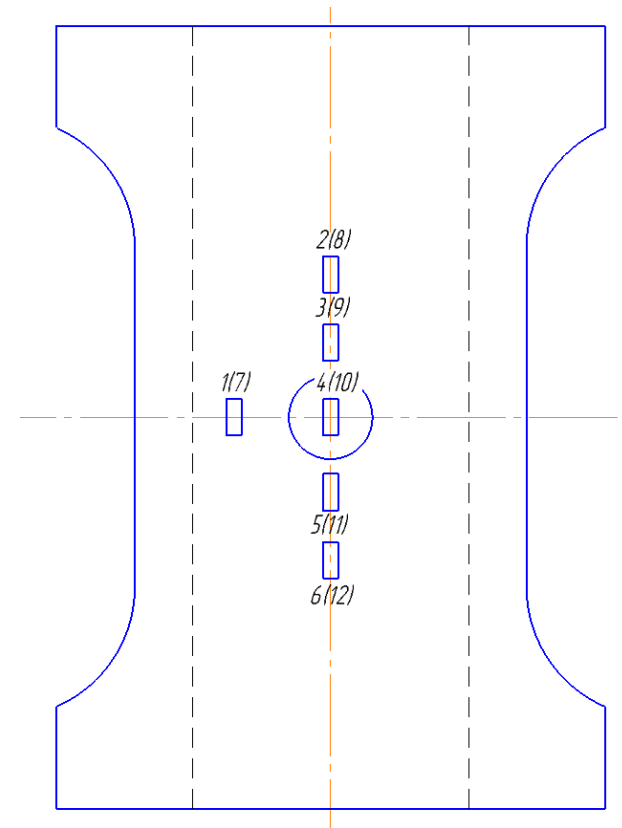


Рисунок 4.46

4.2 Доработка клее-механического ремонта на основе применения наномодифицированной клеевой композиции

В разделе 4.3 настоящей диссертационной работы представлены экспериментальные исследования клее-механического способа ремонта. Показано, что для обеспечения жесткого крепления ремонтирующего элемента в изделиях из ПКМ целесообразна плотная установка крепежных элементов (болты, болт-защелпки).

Также установка ремонтирующей накладки может привести к локальному смещению оси жесткости детали и, как следствие, к уменьшению величины критического напряжения потери устойчивости. Данное предположение подтверждают выполненные расчетные исследования на плоском образце, имитирующим тонкую обшивку летательного аппарата [125] (рисунок 4.47).

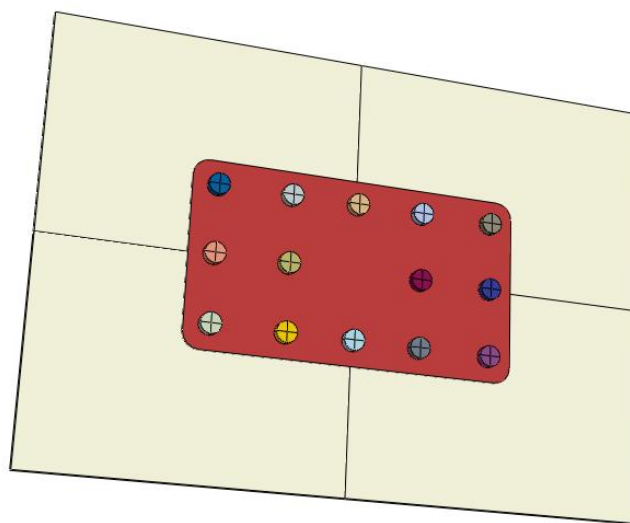


Рисунок 4.47 – Схематичное изображение плоского образца с клее-механическим ремонтом

На рисунке 4.48 показано развитие разрушения отремонтированного образца. Расчет выполнен в программном комплексе Abaqus, совместно со специалистами МФТИ.

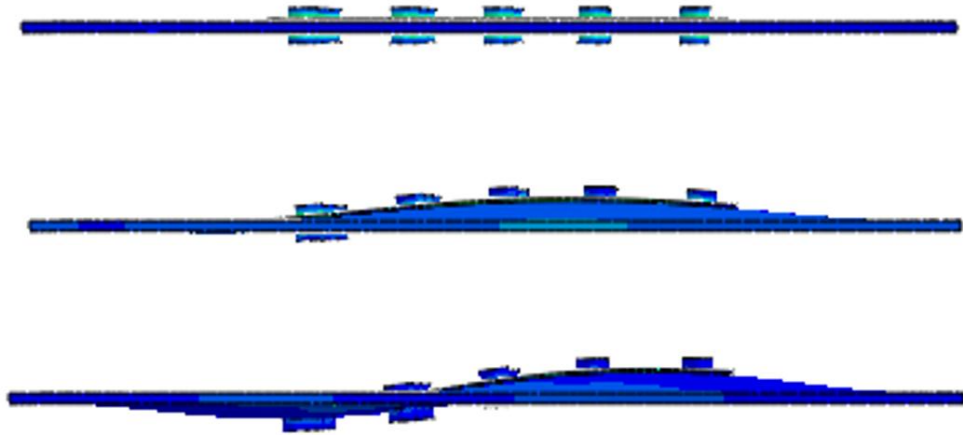


Рисунок 4.48 – механизм разрушения, ремонт с болтовым крепежом

Рассмотрим подробнее механизм разрушения панелей после ремонта.

Как видно из рисунков, накладка тянет за собой ПКМ образец и приводит к местной потере устойчивости по 1й моде (одна волна через образец). В этот период развивается трещина от отверстия, и при дальнейшем нагружении первая мода переходит во вторую (две полуволны) – наступает общая потеря устойчивости.

Представленные расчетно-экспериментальный результаты позволяют сформулировать рекомендации для повышения эффективности ремонта. Для повышения жесткости крепления ремонтирующей накладки целесообразно применить клееболтовое соединение, которое обеспечит одновременное включение в работу всех крепежных элементов, а также предотвратит преждевременную потерю устойчивости в зоне установки ремонтирующей накладки.

На рисунке 4.49 показан результат моделирования поведения плоского образца с клее-механическим ремонтом и с установкой клееболтового крепежа (обеспечивает отсутствие зазоров в соединениях). Из развития разрушения панели видно, что оно схоже с разрушением образца на рисунке 4.48. Однако разрушение происходит по 1й моде, вследствие наличия клея в болтовом соединении. Вследствие склейки накладки и образца и общая потеря несущей способности также происходит позднее.

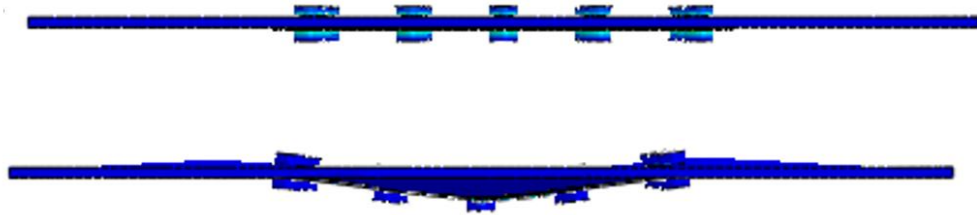


Рисунок 4.48 – Механизм разрушения, ремонт с клееболтовым крепежом

В результате расчета показано, что предельная нагрузка на панель с клееболтовым крепежом на 20% выше чем при применении только болтового соединения.

4.4.1 Проведение клее-механического ремонта трехстрингерной панели с применением наномодифицированной клеевой композиции

Проведен ремонт ударного повреждения в трехстрингерной панели из ПКМ. Повреждение находилось в зоне свободной обшивки между стрингерами. Рассматриваемая технология ремонта также осуществима вне заводских условий при одностороннем доступе к поврежденной поверхности детали. Усиливающая накладка изготовлена из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т либо Н10Т поверх поврежденной зоны, данный материал согласован с технологами ПАО «Корпорация «Иркут». Установка накладки произведена при помощи клеевого и болт-заклепочного соединения с применением результатов полученных в разделах 2,3 и 4 данной диссертационной работы, что позволило обеспечить равномерное включение в работу при нагружении зоны ремонта в процессе эксплуатации всех крепежных элементов, а также устранить неравномерные зазоры между поверхностями болт-заклепок и отверстий в ПКМ. Для этого использована, разработанная в главе 2 нано-модифицированная клеевая композиция с высоким модулем упругости и твердостью. Установка металлического крепежа произведена с применением разработанного в параграфе 4.2 «Способ повышения прочности болтового металло-композиционного соединения» (патент РФ №260788). Толщина

стальной накладке выбрана таким образом, чтобы деформации под нагрузкой накладки и элемента из ПКМ совпадали. Известно, что модуль Юнга у стали ~ в три раза больше чем у углепластика, поэтому применительно к трехстрингерным панелям толщиной 3.0мм. толщина стальной накладки должна составлять около 1.0мм. Стальная накладка перекрывает соседние неповрежденные силовые элементы. Принципиальная схема ремонта представлена на рисунке 4.49. Возможно проведение ремонта без удаления поврежденной зоны.

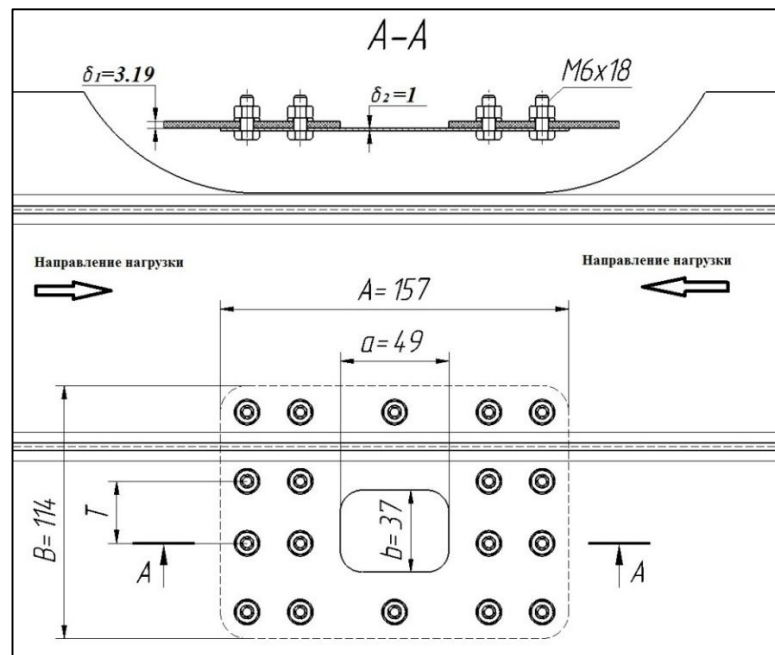


Рисунок 4.49 – Схема ремонта панели

Экспресс ремонт ударного повреждения в трехстрингерной панели производился в следующей последовательности:

- перед установкой металлической накладки на поврежденную зону поверхность образца подвергалась механической очистке. Зачистку поверхности проводили ручным способом наждачной бумагой, без нажима, обеспечивая шероховатость поверхности 4-5 класса и оголения внешних волокон армирующего наполнителя. После зашкуривания детали не обезжировались. Зона зачистки поверхности была шириной не менее 10.0мм по всему периметру от ремонтируемого участка.

- подготовка контактных поверхностей стальной накладки и болтов:
 - протирка ≥ 2 раз поверхности тампоном из чистой ваты, смоченной бензином БР-1;
 - выдержка на воздухе ≥ 15 минут;
 - промывка ацетоном ≥ 2 раза;
 - выдержка на воздухе ≥ 5 минут;
 - обдувка электрокорундовым песком (ПИ 1.2.132-79, п 3.4) с величиной зерна № 20 по режиму: давление 4-5 атм, $(3.9-4,9)10^5$ Па, расстояние при обдувке не более 25 см (ПИ 1.2.178-81, п 3.4). Либо произвести зачистку поверхности ручным способом наждачной бумагой, без нажима.
 - смывка ацетоном (легкой щеточкой) частиц оставшихся на поверхности.
- Все этапы произведенного ремонта изображены на рисунках 4.50-4.54.

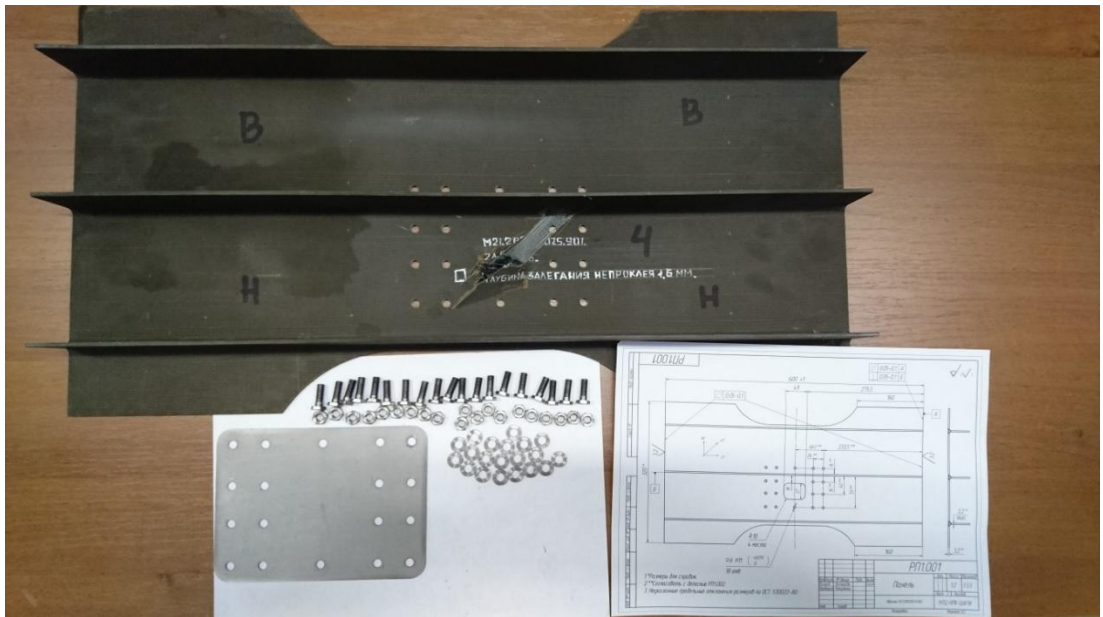


Рисунок 4.50 – Панель с ударным повреждением в зоне обшивки и изготовленной усиливающей накладкой и металлическим крепежом



Рисунок 4.51 – Зачищенная поверхность ремонтируемой панели, вид снаружи

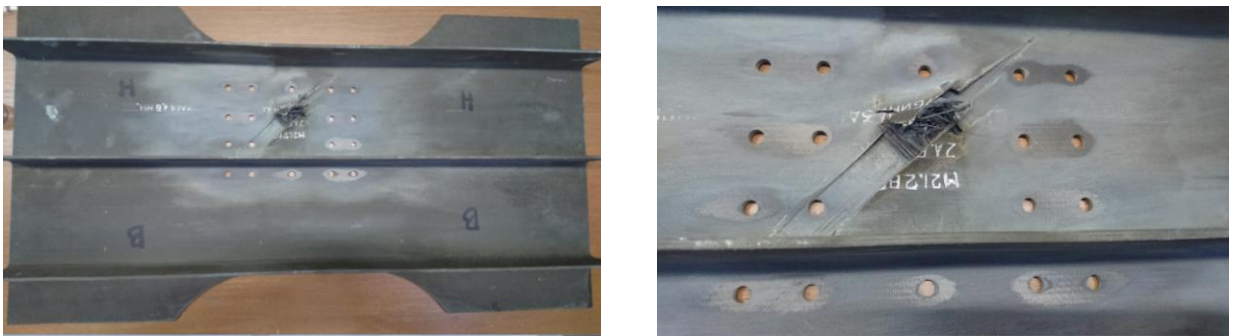


Рисунок 4.52 – Зачищенная поверхность ремонтируемой панели, вид со стороны стрингеров



Рисунок 4.53 – Нанесение наномодифицированной клеевой композиции на все контактные поверхности



а) вид снаружи



б) вид со стороны стрингеров

Рисунок 4.54 – Отремонтированная по технологии с использованием «нано-модифицированной клеевой композиции» трехстрингерная панель

Результаты испытания отремонтированной панели при сжатии показали, что удалось обеспечить включение усиливающей накладки в работу (деформацию) сразу. Получено 100% восстановление прочности отремонтированной панели. Это достигнуто за счет обеспечения жесткого крепления накладки к ремонтируемой панели, в том числе обеспечена равномерная загрузка всех крепежных элементов.

На рисунке 4.55 изображена эпюра действующих, приведенных напряжений в отремонтированной зоне, полученная по результатам тензометрии, рисунок 4.56, датчики 4, 12, при сжатии конструктивно-подобного образца. Видно, что в зоне ремонта измеренные напряжения снижаются несущественно и ремонтная накладка включается в работу.

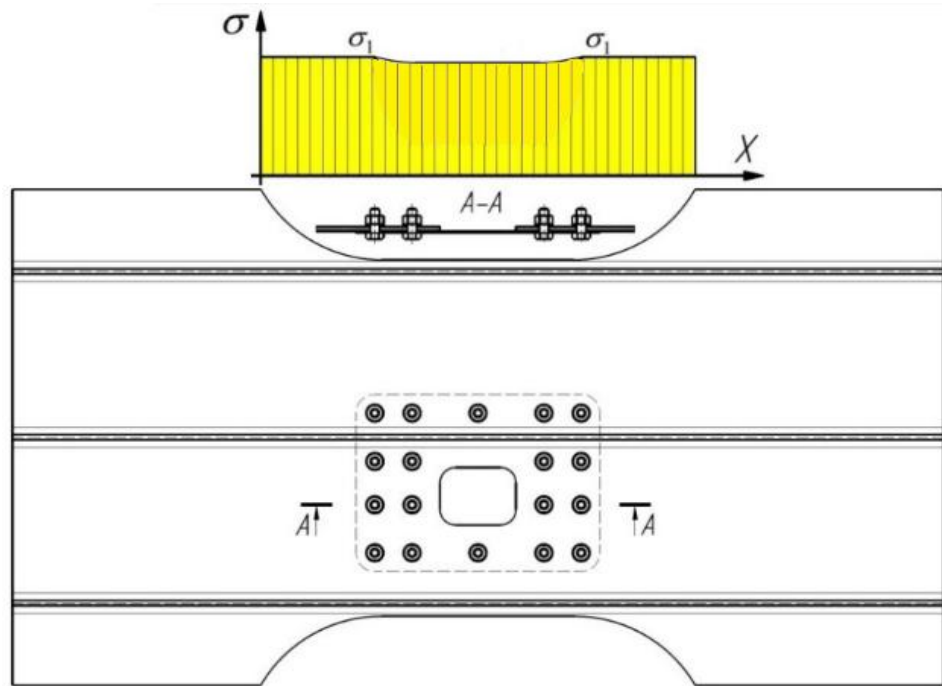


Рисунок 4.55 – Эпюра действующих напряжений в отремонтированной зоне с применением клее-болтового крепежа

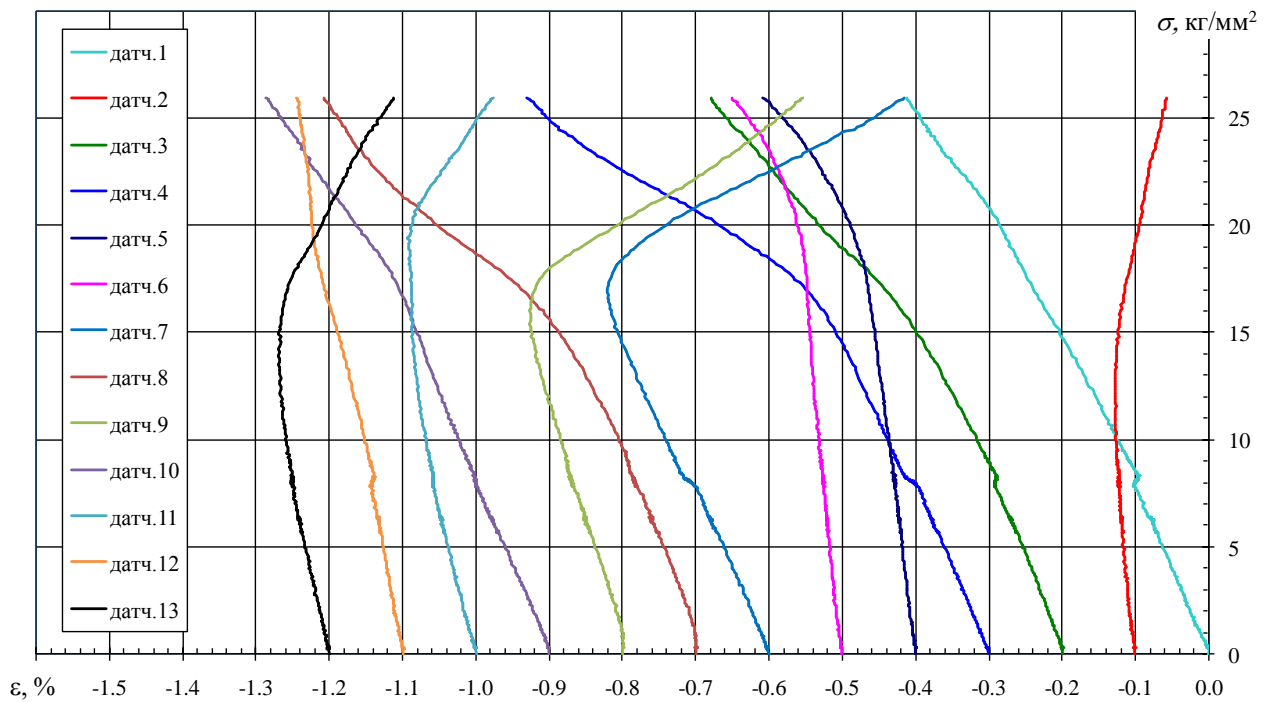


Рисунок 4.56 – Диаграмма деформирования при сжатии панели после ремонта обшивки

Выводы к главе 4

1- Представлены результаты комплексного применения разработанных рекомендаций по изготовлению отверстий, а также устранения дефектов на кромках в отверстиях, образующиеся после механической обработки, и заполнения зазоров между крепежным элементом (болтом) и отверстием, разработанной НМК с повышенными механическими характеристиками

2- Проведение укрепления поврежденных кромок отверстий, устранение концентраций растягивающих и сжимающих напряжений при заполнении зазоров между соединительными элементами (болт, заклепка) и отверстием с использованием нано-модифицированной клеевой композиции, повышает статическую прочность конструктивно-подобных образцов в среднем на 23%, а их усталостную долговечность не менее чем в 6 раз; также повышаются характеристики закрепления ремонтирующих накладок на поврежденных деталях

3- На основе расчетно-экспериментальных исследований эффективности двух основных типов ремонта выявлены их основные достоинства и недостатки. Выполнено их аналитическое сопоставление. Сформулированы рекомендации по повышению эффективности ремонта.

4- Разработан способ ремонта низкоэнергетических ударных повреждений в деталях из ПКМ (в том числе при одностороннем доступе) с использованием раздвижной металлической вставки с отбортовкой, устанавливаемую после выборки поврежденного материала с нормированным натягом и нано-модифицированной клеевой композицией, обеспечивающий необходимые характеристики статической прочности и жесткости отремонтированной детали. При одностороннем доступе раздвижная металлическая вставка выступает менее чем на допустимые 0.5мм за обводообразующую поверхность.

5- Разработан расчетный метод оценки натяга на основе применения МКЭ по критериям разрушения Мизеса-Губера и Цая-Хилла.

6- Применение НМК при проведении клее-механического ремонта с установкой усиливающей накладки с использованием НМК приводит к

устранению недостатка рассматриваемого типа ремонта – недостаточно жесткое закрепление накладки. По результатам экспериментальных исследований видно, что в зоне ремонта измеренные напряжения снижаются несущественно и ремонтная накладка включается в работу сразу.

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 металло-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 использованных источников

1. Браутман Р., Крок Р. Композиционные материалы // Анализ и проектирование конструкций – Том 8 – часть 2. – М.: Машиностроение – 1978. – 261 С.
2. Браутман Р., Крок Р., Нортон Б. Композиционные материалы. // Применение композиционных материалов в технике – М.: Машиностроение – 1978. – 512С.
3. Гуняев Г.М. // Конструирование высокомодульных полимерных композитов. – М.: Машиностроение – 1977. – 160С.
4. Полимерные композиционные материалы // Авиационные материалы. Том 7 – Ч.1. Справочник. – М.: ОНТИ, ВИАМ – 1976. – 391С.
5. Молчанов Б. И., Чукаловский П. А., Варшавский В. Я. // Углепластики. – М.: Химия – 1985. – С. 61.
6. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. // Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия – 1981. – 271С.
7. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. // Прочность и технологии. – М.: Интеллект – 2010. – 352 С.
8. Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. // Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. – Москва: Физматлит, 2013. – С. 89-129.
9. Трунин Ю.П., Ушаков А.Е. Некоторые вопросы оценки и обеспечения эксплуатационной живучести конструкций планера самолета, выполненных из композиционных материалов. // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. Руководящие технические материалы. – Москва: Изд-во ЦАГИ – выпуск X – 1984.
10. Васильев В.В. // Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение – 1988г.
11. Савин С. П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук – Т. 14 – № 4(2) – 2012. – С. 686–693.

12. Гращенко Д. В., Чурсова Л. В. Стратегии развития композиционных и функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5 – С. 231–242.
13. Комиссар О.Н., Хмельницкий А.К. Применение высококачественных полимерных композиционных материалов и наукоемких технологий в изделиях авиационно-космической техники // *Решетневские чтения*. – Т. 1 – № 16 – 2012. – С. 66–67.
14. Бойцов В.Б., Чернявский А.О. Технологические методы повышения прочности и долговечности: Учебное пособие для студентов. – М.: Машиностроение – 2005. – 128С.
15. Сироткин О.С., Воробей В.В. // *Соединения конструкций из композиционных материалов*. – М.: Машиностроение – 1985. – 169 С.
16. Сироткин О.С., Гришин В.И., Литвинов В.Б. // *Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники*. – М.: Машиностроение – 2006. – 331С.
17. Keith T. Kedward, H. Kim *Joining and Repair of Composite Structures* // *ASTM International – STP 1455 – 2005*. – 216 p.
18. Мэттьюз Ф., Ролингз Р. // *Композитные материалы. Механика и технология*. – М.: Техносфера – 2004. – 408 С. – Пат. 147596
19. Alan Baker, Stuart Dutton, Donald Kelly // *Composite Materials for Aircraft Structures. Second Edition Published by American institute of Aeronautics and Astronautics. – Inc., Virginia – 2004*. – 597 p.
20. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. // *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие под ред. А.А. Берлина*. – СПб.: Профессия – 2009.
21. Смотровая С. А., Смотров А. В., Симонов-Емельянов И. Д. Полимерные композиционные материалы на основе высокопрочных и высокомодульных волокон для высоконагруженных конструкций летательных аппаратов // *Конструкции из композиционных материалов*. – № 1 – 2016. – С. 41-51.

22. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. – С. 7-17.
23. Замула Г.Н., Трунин Ю.П. Некоторые проблемы прочности и весового совершенства конструкций из композиционных материалов // *Труды ЦАГИ – 2007*. – № 2675 – С. 31.
24. Трунин Ю.П. Критерии прочности и модели разрушения механического соединения элементов из полимерных композиционных материалов // *Труды ЦАГИ – 2013*. – С. 91.
25. Трунин Ю.П. Усталость и живучесть типовых мест конструкций из полимерных композиционных материалов // *Техника воздушного флота*. – 1999. – № 6. – С. 26.
26. Abrao A. M., Campos Rubio J. C., Cenac F., Collombet F., Davim J.P., Deleris M., Faria P. E., Girot F., Gutierrez M. E., Illiescu D., Jackson M. J., Lamikiz A., Zhang L., Novakov T., Lopez De Lacalle L. N., Pramanik A., Zitoune R. // *Machining composite materials – 2010*.
27. Capello E., Langella A., Nele L., Paolette A., Santo L., Tagliaferri V. Drilling polymeric matrix composites // *Machining Fundamentals and Recent Advances – Springer Verlag – 2008*. – P. 167 – 194,
28. Wang X. M., Zhang L. C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics // *International Journal of Machine Tools and Manufacture – Vol. 43 – 2003*. – P. 1015-1022.
29. Krishnamurphy R., Santhanakrishnan G., Malhorta S. K. Machining of polymeric composites // *Proceedings of the Machining of composite Materials Symposium – ASM material week – Chicago – 1992*. – P. 139 – 148,
30. В.Д. Вермель, А.М. Доценко, Г.А. Корнилов, С.М. Наумов, С.А. Титов Сопоставление технологий обработки элементов конструкций из полимерных композиционных материалов. // *Оборонная техника – Вып. 8-9 – 2012г.* – С. 57–61.
31. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (ОБЗОР) // *Труды ВИАМ, 2016*. – № 9 (45) – С. 12.

- 32.Макаров Ф.М., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники // Вестник ПНИПУ – Т.17 – №2 – С. 30–41.
- 33.Макаров Ф.М., Мешкас А.Е., Ширинкин В.В. Технологии, позволяющие повысить эффективность обработки композиционных материалов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации, 2015. – Том 1 – С.179–189.
34. Гулевский И.В. Выявление ударных повреждений композитных конструкций во время испытаний // Труды ЦАГИ – выпуск 2725, 2013. – С. 155–161.
- 35.Проблемы совершенствования ремонта авиационной техники // Сборник научных трудов МИИГА – М.: РИО МИИГА, 1989.
- 36.Ривин Г.Л. // Ремонт конструкций из полимерных конструкционных материалов: Учебное пособие – Ульяновск: УлГТУ, 2000.
37. Husking Brian C., Baker Alan A. Composite Materials for Aircraft Structures // New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986. – 237 P.
38. Браутман Л., Крок Р. Разрушение и усталость // Композиционные материалы – Т. 5 – Ред. Л. Браутман. – М.: Мир., 1978. – 486 С.
39. Аниховская Л.И. Клеи и материалы на их основе для ремонта конструкций авиационной техники // Клеи. Герметики. Технологии, 2006. – №2 – С. 21–23.
- 40.Жадова Н.С., Тюменева Т.Ю., Шарова И.А., Лукина Н.Ф. Перспективные технологии временного оперативного ремонта авиационной техники // Авиационные материалы и технологии, 2013, – №2 – С. 67–70.
41. Гришин В.И., Лазарев В.В., Трунин Ю.П., Цымбалюк В.И., Чедрик В.В. Проектирование конструкции крыла из композиционных материалов. // ТВФ – Т. LXXXIV – №1 (698), 2010. – С.20–40.
- 42.Nautier M., Leveque D., Huchette C., Olivier P. Investigation of a composite repair method by liquid resin infusion.
43. Ткачев А.Г., Сухоруков А.К., Блохин А.Н., Зайцев И.А. Конструкторская разработка технологического процесса модифицирования эпоксидной матрицы функционализированными углеродными нанотрубками // Современные

- твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент // Материалы IX Международной научно-инновационной молодёжной конференции, 2017. – С. 172–173.
44. Мильчанин О.В., Комаров Ф.Ф., Ткачев А.Г., Меметов Н.Р., Парфимович И.Д., Пархоменко И.Н. Структурные свойства композитных материалов на основе эпоксидного полимера с многостенными углеродными нанотрубками и графеновыми слоистыми структурами // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение – Материалы II Международной научно-практической конференции, 2017. – С. 287–289.
45. Ткачев А.Г., Артемов В.Н., Мележик А.В., Рухов А.В., Аладинский А.А. Углеродные наноматериалы серии «таунит»: производство функционализация, применение // Нанотехника, 2014. – № 1 – С. 32.
46. Предтеченский М.Р., Тухто О.М., Коваль И.Ю. // патент РФ 2 478 572 на изобретение – Способ получения углеродных нанотрубок и реактор (варианты).
47. Раков Э.Г. Состояние производства углеродных нанотрубок и нановолокон // Российские нанотехнологии, 2008. – Т. 3 – № 9–10 – С. 89–94.
48. Кондрашов С.В., Грачев В.П., Акатенков Р.В., Алексашин В.М., Деев И.С., Аношкин И.В., Раков Э.Г., Иржак В.И. Модифицирование эпоксидных полимеров малыми добавками многослойных углеродных нанотрубок // Высокомолекулярные соединения – Серия А, 2014. – Т. 56 – № 3 – С. 316.
49. Каблов Е. Н., Кондрашов С.В. Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии, 2013. – Т. 8 – № 3–4 – С. 24 – 42
50. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексашин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // Российский химический журнал, 2010. – Т. LIV – №1 [Электронный ресурс] – URL: <http://viam.ru/public/>
51. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Попков О.В., Соловьянчик Л.В. Физико-механические свойства нанокompозитов с УНТ (обзор) // Труды ВИАМ – №5 (41), 2016. – С.61–83

52. Mittal G., Dhand V., Rhee K.Y., Park S.-J., Lee W.R. A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites // *J. Industrial Engineering Chemistry*, 2015. – Vol. 21 – P. 11–25.
53. Wang C., Guo Z.-X., Fu S., Wu W., Zhu D. Polymers containing fullerene or carbon nanotube structures // *Prog. Polym. Sci.*, 2004. – Vol. 29 – P. 1079–1141.
54. Safadi B., Andrews R., Grulke E.A. Multiwalled carbon nanotube polymer composites: Synthesis and characterization of thin films // *J. Appl. Polym. Sci.*, 2002. – Vol. 84 – P. 2660–2669.
55. Jang J., Bae J., Yoon S.-H. A study on the effect of surface treatment of carbon nanotubes for liquid crystalline epoxide-carbon nanotube composites // *J. Mater. Chem.*, 2003. – Vol. 13 – P. 676–681.
56. Ma P.-C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.-K. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review // *Composites Part A*, 2010. – Vol. 41 – P. 1345–1367.
57. Kim M., Park Y.-B., Okoli O.I., Zhang C. Processing, characterization, and modeling of carbon nanotube-reinforced multiscale composites // *Compos. Sci. Technol.*, 2009. – Vol. 69 – P. 335–342.
58. Goenka S., Sant V., Sant S. Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering // *J. Control. Release*, 2014. – Vol. 173 – P. 75–88.
59. Tkalya E.E., Ghislandi M., With G., Koning C.E. The use of surfactants for dispersing carbon nanotubes and graphene to make conductive nanocomposites // *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 2012. – Vol. 17 – P. 225–232.
60. В. Д. Вермель, С. А. Титов, Ю. В. Корнев, Е. А. Никитина, О. В. Бойко, С. В. Чиркунова Наномодифицированная клеевая композиция для повышения прочности узлов соединений авиационных конструкций на основе полимерных композиционных материалов // Сборник статей «Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения» – М.: Наука, 2016. – 488-497С.
61. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости – М.: Машиностроение, 1969. – 504 С.

62. Treacy M.M.J., Ebbesen T.W., Gibson T.M. Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes // *Nature*. - 1996. - P. 678-680.
63. Yu M.F., Lourie O., Dyer M.J., Moloni K., Kelly T.F., Ruoff R.S. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load // *Science*. - 2000. Vol. 287. - P. 637-640.
64. Ageev O.A., Il'in O.I., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Development of methods for determining young's modulus of vertically oriented carbon nanotubes by the nanoindentation method // *Russ. Nanotekhnol.* - 2012. Vol. 7. - P. 54-59.
65. Qian D., Dickey E.C., Andrews R., Rantell T. Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites // *Appl. Phys. Lett.* - 2000. Vol. 76. - P. 2868-2870.
66. Biercuk M.J., Llaguno M.C., Radosavljevic M., Hyun J.K., Johnson A.T., Fischer J.E. Carbon nanotubes composites for thermal management // *Appl. Phys. Lett.* - 2002. Vol. 80. - P. 2767.
67. Cadek M., Coleman J.N., Barron V., Hedicke K, Blau W.J. Morphological and mechanical properties of carbon-nanotube-reinforced semicrystalline and amorphous polymer composites // *Appl. Phys. Lett.* - 2002. Vol. 81. - P. 5123-5125.
68. Andrews R., Jacques D., Minot M., Rantell T. Fabrication of carbon multiwall nanotube/polymer composites by shear mixing // *Macromol. Mater. Eng.* - 2002. Vol. 287. - P. 395-403.
69. Pötschke P., Bhattacharyya A.R., Janke A., Pegel S., Leonhardt A., Täschner C., Ritschel M., Roth S., Hornbostel B., Cech J. Melt mixing as method to disperse carbon nanotubes into thermoplastic polymers // *Fuller. Nanotubes Carbon Nanostruct.* - 2005. Vol. 13. - P. 211-224.
70. Ajayan P.M., Ebbesen T.W., Ichihashi T., Iijima S., Tanigaki K., Hiura H. Opening carbon nanotubes with oxygen and implications for filling // *Nature*. - 1993. Vol. 362. - P. 522-525.

71. Cooper C.A., Ravich D., Lips D., Mayer J., Wagner H.D. Distribution and alignment of carbon nanotubes and nanofibrils in a polymer matrix // *Compos. Sci. Technol.* - 2002. Vol. 62. - P. 1105-1112.
72. Kosmidou T.V., Vatalis A.S., Delides C.G., Logakis E., Pissis P., Papanicolaou G.C. Structural, mechanical and electrical characterization of epoxy-amine/carbon black nanocomposites // *eXPRESS Polym. Lett.* - 2008. Vol. 2. - P. 364-372.
73. Cheng Ma P., Kim J.-K., Zhong Tang B. Effects of silane functionalization on the properties of carbon nanotube/epoxy nanocomposites // *Compos. Sci. Technol.* - 2007. Vol. 67. - P. 2965-2972.
74. Velasco-Santos C., Martinez-Hernandez A.L., Fisher F.T., Ruoff R., Castano V.M. Dynamical-mechanical and thermal analysis of carbon nanotube-methyl-ethyl methacrylate nanocomposites // *Chem. Mater.* - 2003. Vol. 15. - P. 4470-4475.
75. Fukushima T., Kosaka A., Yamamoto Y., Aimiya T., Notazawa S., Takigawa T., Inabe T., Aida T. Dramatic effect of dispersed carbon nanotubes on the mechanical and electroconductive properties of polymers derived from ionic liquids // *Small.* - 2006. Vol. 2. - P. 554-560.
76. Chae H.G., Minus M.L., Kumar S. Oriented and exfoliated single wall carbon nanotubes in polyacrylonitrile // *Polymer.* - 2006. Vol. 47. - P. 3494-3504.
77. Доценко А. М. Аналитическое описание распределения напряжений в образце типа проушины при нагружении ее отверстия через болт, установленный с упругим натягом // *Авиационная промышленность.* – № 12, 1990. – С.10-13, ДСП.
78. Сухарев И. П. Прочность шарнирных узлов машин. // М: Машиностроение, 1977. – 168 С.
79. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. // М.: Наука, 1984. – 352 С.
80. Волков-Богородский Д.Б. Метод радиальных множителей в задачах механики неоднородных сред с многослойными включениями / Д.Б. Волков-Богородский // *Механика композиционных материалов и конструкций* – 2016. – Том 22 – №1 – С. 19–39

81. Яновский Ю.Г., Власов А.Н., Никитина Е.А., Карнет Ю.Н. Анализ теоретической прочности межфазных слоев адсорбционных комплексов полимерных композитных сред // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т.13. – №1. – С.33-41
82. Яновский Ю.Г., Григорьев Ф.В., Никитина Е.А., Власов А.Н., Карнет Ю.Н. Наномеханические свойства нанокластеров полимерных композитов // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т.11. – №3. – С.61-74
83. Яновский Ю.Г., Никитина Е.А., Никитин С.М., Карнет Ю.Н., Композиты на основе полимерных матриц и углеродно-силикатных нанонаполнителей. квантово-механическое исследование механических свойств, прогнозирование эффекта усиления // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. - Т.15, - №4, -С.566-589
84. Карнет Ю. Н., Никитин С. М., Никитина Е. А., Яновский Ю. Г. Компьютерное моделирование механических свойств углеродных наноструктур // Известия РАН. Механика твердого тела, 2010. – №4 – С.121-137
85. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A. A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science. – V. 306. – P. 666–669
86. Chen Zh., Lin Y.-M., Rooks M. J., Avouris P. Graphene Nano-Ribbon Electronics // Physica E. – 2007. – V. 40. – P. 228–232
87. Bunch J. S., van der Zande A. M., Verbridge S. S., Frank I. W., Tanenbaum D. M., Parpia J. M., Craighead H. G., McEuen P. L. Electromechanical Resonators from Graphene Sheets // Science. – 2007. – V. 315. – P. 490–493
88. Lee C., Wei X., Kysar J. W., Hone J. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene // Science. – 2008. – V. 321. P. 385–388
89. Du F., Fischer J.E., Winey K.I. Coagulation method for preparing single-walled carbon nanotube/poly(methyl methacrylate) composites and their modulus, electrical conductivity, and thermal stability // J. Polym. Sci. B. - 2003. Vol. 41. - P. 3333-3338.
90. Shaffer M.S.P., Winlde A.H. Fabrication and characterization of carbon nanotube/poly(vinyl alcohol) composites // Adv. Mater. - 1999. Vol. 11. - P. 937-941.

91. Safadi B., Andrews R., Grulke E.A. Multiwalled carbon nanotube polymer composites: Synthesis and characterization of thin films // *J. Appl. Polym. Sci.* - 2002. Vol. 84. - P. 2660-2669.
92. Jang J., Bae J., Yoon S.-H. A study on the effect of surface treatment of carbon nanotubes for liquid crystalline epoxide-carbon nanotube composites // *J. Mater. Chem.* - 2003. Vol. 13. - P. 676-681.
93. Gong X., Liu J., Baskaran S., Voise R.D., Young J.S. Surfactant-assisted processing of carbon nanotube/polymer composites // *Chem. Mater.* - 2000. Vol. 12. - P. 1049-1052.
94. Cui S., Canet R., Derre A. Couzi M., Delhaes P. Characterization of multiwall carbon nanotubes and influence of surfactant in the nanocomposite processing // *Carbon.* - 2003. Vol. 41. - P. 797-809.
95. Sen R., Zhao B., Perea D. Itkis ME, Hu H, Love J, et al. Preparation of single walled carbon nanotube reinforced polystyrene and polyurethane nanofibers and membranes by electrospinning // *Nano Lett.* - 2004. Vol. 4. - P. 459-464.
96. Dror Y., Salalha W., Khalfin R.L., Cohen Y., Yarin A.L., Zussman E. Carbon nanotubes embedded in oriented polymer nanofibers by electrospinning // *Langmuir.* - 2003. Vol. 19. - P. 7012-7020.
97. Andrews R., Jacques D., Qian D. Rantell T. Multiwall carbon nanotubes: Synthesis and application // *Acc. Chem. Res.* - 2002. Vol. 35. - P. 1008-1017.
98. Hill D.E., Lin Y., Rao A.M., Allard L.F., Sun Y.P. Functionalization of carbon nanotubes with polystyrene // *Macromolecules.* - 2002. Vol. 35. - P. 9466-9471.
99. Pötschke P., Bhattacharyya A.R., Janke A. Melt mixing of polycarbonate with multiwalled carbon nanotubes: microscopic studies on the state of dispersion // *Eur. Polym. J.* - 2004. Vol. 40. - P. 137-148.
100. Haggenueller H., Zhou W., Fischer J.E., Winey K.I. Production and characterization of highly aligned single-walled carbon nanotubes in polymer composites // *J. Nanosci. Nanotechnol.* - 2003. Vol. 3. - P. 105-110.
101. Cooper C.A., Ravich D., Lips D., Mayer J., Wagner H.D. Distribution and alignment of carbon nanotubes and nanofibrils in a polymer matrix // *Compos. Sci. Technol.* - 2002. Vol. 62. - P. 1105-1112.

102. Moniruzzaman M., Winey K.I. Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes // *Macromolecules*. - 2006. Vol. 39. - P. 5194-5205.
103. Qian D., Dickey E.C., Andrews R., Rantell T. Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites // *Appl. Phys. Lett.* - 2000. Vol. 76. - P. 2868-2870.
104. Sandler J.K.W., Pegel S., Cadek M., Gojny F., Van E.M., Lohmar J., Blau W.J., Schulte K., Windle A.H., Shaffer M.S.P. A comparative study of melt spun polyamide-12 fibres reinforced with carbon nanotubes and nanofibres // *Polymer*. - 2004. Vol. 45. - P. 2001-2015.
105. Kearns J.C., Shambaugh R.L. Polypropylene fibers reinforced with carbon nanotubes // *J. Appl. Polym. Sci.* - 2002. Vol. 86. - P. 2079-2084.
106. Kim S.T., Choi H.J., Hong S.M. Bulk polymerized polystyrene in the presence of multiwalled carbon nanotubes // *Colloid Polym. Sci.* - 2007. Vol. 285. - P. 593-598.
107. Yoo J.H., Jung Y.C., Sahoo N.G. Cha J.W. Electroactive shape memory polyurethane nanocomposites from in-situ polymerization with carbon nanotubes // *J. Macromol. Sci. B*. - 2006. Vol. 45. - P. 441-451.
108. Kang M., Myung S.J., Jin H.J. Nylon 610 and carbon nanotube composite by in situ interfacial polymerization // *Polymer*. - 2006. Vol. 47. - P. 3961-3966.
109. Moiala A., Li Q., Kinloch I.A., Windle A.H. Thermal and electrical conductivity of single- and multi-walled // *Compos. Sci. Technol.* - 2006. Vol. 66. - P. 1285-1288.
110. Li X., Gao H.S., Scrivens W.A., Fei D., Xu X., Sutton M.A., Reynolds A.P., Myrick, M.L. Nanomechanical characterization of single-walled carbon nanotube-reinforced epoxy composites // *Nanotechnology*. - 2004. Vol. 15. - P. 1416-1423.
111. Ma P.C., Tang B.Z., Kim J.-K. Effect of CNT decoration with silver nanoparticles on electrical conductivity of CNT-polymer composites // *Carbon*. - 2008. Vol. 46. - P. 1497-1505.
112. Martin C.A., Sandler J., Windle A.H., Schwarz M., Bauhofer W., Schulte K. Shaffer M.S.P. Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites // *Polymer*. - 2005. Vol. 46. - P. 877-886.

113. Anthony C. Fisher-Cripps “Nanoindentation”, Springer-Verlag, New York, 2002. - 197 p.
114. Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, vol. 7, № 6, pp. 1564-1583.
115. Golovin Yu.I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers, and films: A Review. *Physics of the Solid State*, 2008, vol. 50, issue 12, pp. 2205-2236.
116. Гришин В.И., Качарава И.Н., Орлова О.А., Титов С.А., Проектировочный расчет упруго-прочностных характеристик тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов. *Труды ЦАГИ*, вып.2768, 2018.
117. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984, 263.
118. Alan Baker, Stuart Dutton, Donald Kelly, *Composite Materials for Aircraft Structures*. Second Edition Published by American institute of Aeronautics and Astronautics. – Inc., Virginia, 2004.
119. Андриенко В.М., Белозеров Л.Г., Кутыинов В.Ф. Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. *РТМ ЦАГИ*, выпуски I–XI, 1973-1989
120. Гришин В.И. Оценка рациональных конструктивных параметров в металло-композитных болтовых соединениях / В.И. Гришин, И.Н Качарава // Сборник научных трудов международной школы-конференции молодых ученых посвященной 70-летию основания Национальной Академии Наук Армении –2013. – С. 134–136.
121. Жадова Н.С., Тюменева Т.Ю., Шарова И.А., Лукина Н.Ф. Перспективные технологии временного оперативного ремонта авиационной техники. - *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №2. С. 67-70.
122. Ривин Г.Л. Ремонт конструкций из полимерных конструкционных материалов: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2000.

123. Смотровая С.А. Технологии изготовления силовых агрегатов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / С.А.Смотровая, С.М. Наумов, А.В. Смотров // Техносфера – 2015. – С.216
124. Ендогур А.И. Проектирование конструкций самолетов. – М.: Машиностроение, 1987, 208 с.
125. 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.