МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

НАСОНОВ ФЕДОР АНДРЕЕВИЧ

«ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ КРЕПЕЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ИХ ВЛИЯНИЯ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЭПОКСИУГЛЕПЛАСТИКОВ»

Специальность 05.16.09 «Материаловедение (машиностроение)»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Бухаров Сергей Викторович

Москва 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…… 4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР…… 12
1.1 Современные классификации дефектов и повреждений ПКМ…… 13
1.1.1 Классификация дефектов ПКМ деталей авиационной техники по причинам возникновения…… 14
1.1.2 Классификация эксплуатационных дефектов в соответствии с РТМ ремонта и обслуживания АТ в войсках по признаку нахождения в зоне крепежа или вне ее……. 16
1.2 Данные по влиянию отверстий и дефектов в них на остаточную прочность эпоксиуглепластиков и несущих конструкций на их основе…… 18
1.3 Современное состояние вопроса образования отверстий в авиационной промышленности и сборки изделий и агрегатов из ПКМ 28
Выводы по первой главе…….. 41
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ…….. 43
2.1 Объекты исследования……. 43
2.1.1 Углепластик ВКУ-30К.Р14535…….. 43
2.1.2 Стеклопластик ВПС-32К10…… 45
2.1.3 Экспериментальный углепластик Р14535/ЭД-20+ПЭПА…... 46
2.2 Методы исследований……. 46
ГЛАВА 3. ЦЕЛЕВОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ И УГЛЕПЛАСТИКА НА ИХ ОСНОВЕ – КАК МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ…….. 49
3.1 Оценка целевого модифицирования с точки зрения влияния на технологические свойства композиций…….. 50
3.2 Оценка влияния на кинетику отверждения и корректировка параметров технологического процесса пропитки и отверждения….. 53
3.3 Изготовление экспериментальных углепластиковых образцов….. 61
3.4 Оценка влияния на основные механические свойства……. 64
3.5 Исследование влияния модифицирования на температуры в зоне резания при образовании отверстий методами механической обработки…… 65
3.6 Оценка влияния на качество отверстий и нанесение первичной дефектности механической обработкой при образовании отверстий... 76
3.6.1 Контроль с помощью акустической томографии…… 77
3.6.2 Рентгеновский контроль углепластиковых образцов……. 78

3.6.3 Оценка с помощью профилометрического метода…… 81
3.6.4 Исследование образцов методом компьютерной рентгеновской томографии……. 83
3.6.5 Математическая модель процесса механической обработки, отражающая эффективность применения целевого модифицирования для повышения качества отверстий и снижения нанесения дефектности при механической обработке… 87
Выводы по главе…… 96
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА УПРОЧНЕНИЯ КРЕПЕЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ В УГЛЕПЛАСТИКАХ…….. 98
4.1 Требования, предъявляемые к методу установки подкрепляющего элемента, и базирующихся на их основе основные принципы его формирования…… 99
4.2 Выбор и назначение материалов эластичных формующих элементов и основные технические требования……. 101
4.3 Проектирование технологического процесса и назначение основных параметров технологического процесса компрессионного формования…… 105
4.3.1 Подготовительные этапы…… 106
4.3.2 Основной этап……. 108
4.3.3 Заключительные этапы…….. 110
Выводы по главе……. 114
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ УСТАНОВКИ ПОДКРЕПЛЯЮЩЕЙ ВТУЛКИ ТЕРМОКОМПРЕССИОННЫМ МЕТОДОМ…….. 117
5.1 Анализ напряженно-деформированного состояния в зоне отверстия и влияние на него подкрепляющего элемента……. 117
5.1.1 Нагружение пластины с отверстием без втулки……..…… 119
5.1.2 Нагружение пластины с отверстием с установленной втулкой…… 121
5.1.3 Количественное сравнение вариантов без втулки и с втулкой 123
5.2 Оценка эффективности с помощью компьютерного моделирования…… 125
5.3 Оценка эффективности по результатам механических испытаний.. 137
Выводы по главе…… 138
ВЫВОДЫ 140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 143

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы:

Полимерные композиционные материалы все шире применяются во многих отраслях промышленности, и прежде всего в аэрокосмической промышленности благодаря их высоким упруго-прочностным и функциональным удельным характеристикам.

Наряду с неоспоримыми преимуществами полимерных композитов перед другими конструкционными и функциональными материаламиполимерным композитам также присущ и ряд недостатков, в т.ч. невозможность создания заведомо «бездефектных структур» и относительно легкая повреждаемость композитов, например, при ударных воздействиях. Именно поэтому решение задач, связанных со снижением несущей способности и остаточного ресурса деталей, узлов и агрегатов, содержащих в своем составе композиционные материалы, в связи с зародившимися и развивающимися дефектами, является актуальной проблемой современного авиационного материаловедения и науки о технологии. Общепризнанным является суждение о первоначальной неизбежной дефектности углепластиков и других волокнистых полимерных композиционных материалов. В связи с этим проектирование конструкций ведется с учетом первоначальной дефектности и идеологией работы конструкций с допустимыми дефектами. Вместе с тем, необходимо обеспечивать условия изготовления и эксплуатации конструкций, не приводящими к значительному увеличению размеров дефектов, их количества, т.е. оставлять размеры и количество дефектов в поле допустимых значений в течение всего срока службы изделий при обеспечении заданных коэффициентов запаса прочности авиационных конструкций.

Помимо повреждений и дефектов, приобретаемых при формообразовании деталей и при эксплуатации изделий, большую часть микроповреждений наносят композитам такие операции, различные виды механической обработки (точение, фрезерование, резание, образование отверстий). Известно, что для полимерных

композиционных материалов, а особо для волокнистых ПКМ, наполненных длинноволокнистыми наполнителями, образование отверстий с помощью локального удаления материала, само по себе резко снижает процент реализации высоких упруго-прочностных свойств композитов, как материала, так и конструкции в целом. Прежде всего это связано как с нарушением сплошности системы «матрица – наполнитель», так и «перерезанием» нитей основы, направленных, как правило вдоль силовых полей механических нагружений конструкции в целом. Помимо увеличения концентрации напряжений при образовании отверстий, что очевидно снижает несущую способность конструкций из ПКМ, часто сам процесс механической обработки в целях получения отверстий наносит первичные повреждения материалу, которые впоследствии перерастают в значительные дефекты. В связи с этим актуальной проблемой также является не только выбор и назначение оптимальных методов и параметров механической обработки, оборудования, инструмента, но и обеспечение приспособленности материалов к механической обработке и нивелировании ее отрицательных последствий с точки зрения повреждаемости. С этой точки зрения целесообразно рассмотреть и развить материаловедческие и технологические (конструктивно-технологические) подходы (решения).

При анализе имеющихся в открытом доступе данных о количестве дефектов по мере начала эксплуатации боевых истребителей, а также продолжения испытаний статических машин (наземных стендов), можно сделать вывод, что в зоне высокоресурсного крепежа (большинство из них – болты диаметром 6 мм, выходящие на внешний теоретический контур) повышена вероятность зарождения и развития дефектов типа межслоевая несплошность, зародившаяся на этапах механической обработки (образование отверстий) и сборки композитных агрегатов с элементами каркаса.

Все вышесказанное подтверждает, что еще достаточно длительное время решение проблем образования отверстий в полимерных композитах способами механической обработки будет крайне актуальным. В указанных условиях, даже с

учетом «неоптимальных нарушений сплошности системы «матрица – наполнитель» и перерезания направленных волокон наполнителя, стоит проблема изыскания возможностей минимальной дефектности пластика в зонах вблизи отверстий в результате механической обработки и поиска путей снижения количества микроповреждений пластика, а также максимального «залечивания» уже имеющихся микроповреждений или снижения их влияния на несущую способность.

Цель работы:

Разработка и оценка эффективности материаловедческих и технологических подходов в решении проблемы снижения влияния производственных и эксплуатационных дефектов в отверстиях монолитных конструкционных эпоксидных углепластиков на несущую способность авиационных конструкций.

Основные задачи:

1 Рассмотрение производственных и эксплуатационных дефектов и их влияние на несущую способность авиационных конструкций, изготовленных из современных полимерных композиционных материалов

2 Разработка и экспериментальная проверка материаловедческого подхода к решению проблемы повреждаемости эпоксидных матриц углепластиков при формировании в них отверстий механической обработкой

3 Разработка и экспериментальная проверка конструктивно-технологического решения восстановления несущей способности эпоксиуглепластиков подкреплением отверстий путем установки в них стеклопластиковых втулок термокомпрессионным методом

4 Оценка эффективности предложенных конструкторско-технологических решений подкрепления крепежных отверстий и восстановления несущей

способности эпоксиуглепластиков расчетно-аналитическим методом и компьютерным моделированием.

Научная новизна:

1. Впервые предложена модификация эпоксидных матриц и углепластиков на их основе стеаратом цинка для улучшения условий резания при формировании отверстий механической обработкой и снижения их дефектности. Установлена наиболее эффективная концентрация модификатора в количестве 0,1-0,3 % масс., приводящая к снижению температуры резания в зависимости от толщины образцов матрицы на 50 - 60 % и типа режущего инструмента - на 60 - 70 % и шероховатости поверхности стенок отверстия - на 20 - 25 %. В углепластике эффект модификации матрицы приводит по данным компьютерной рентгеновской томографии к снижению дефектности в виде структурной неоднородности материала вблизи отверстия на 65 – 70 %.

2. Впервые предложен способ повышения несущей способности конструкционных эпоксиуглепластиков путем установки в крепежные отверстия стеклопластиковых втулок, выполняющих роль стопперов в процессе эксплуатации авиационных конструкций. Повышение несущей способности эпоксиуглепластиков по результатам экспериментальной оценки составляет 15 %, теоретическим расчетам – 27 % и компьютерному моделированию: 20-27 %.

Практическая значимость работы:

Впервые разработан и апробирован термокомпрессионный метод установки подкрепляющих или ремонтных стеклопластиковых втулок в отверстиях эпоксиуглепластиков, позволяющий достигнуть повышения их несущей способности на 15 %, подтвержденный расчетно-аналитическими методами и компьютерным моделированием

Определен состав модифицированного эпоксидного связующего, изучена методом капли его смачивающая способность полированных пластин графита, моделирующих поверхность углеродного волокна, определены реологические и термокинетические параметры его отверждения. Установлено отсутствие влияние модификатора на угол смачивания поверхности углеродных материалов, вязкость расплава связующего и условий его отверждения, что позволяет использовать общепринятые технологии совмещения модифицированного связующего с углеродными волокнистыми наполнителями и формования изделий на их основе.

Методом ДМА установлено незначительное влияние модификатора на температуру стеклования отвержденных по стандартному режиму эпоксидных связующих. Снижение теплостойкости модифицированных матриц не превышало 8-10 %.

Выбрана окружная схема армирования стеклопластиковых втулок, намоточная технология сборки исходной заготовки втулки и ее установки в отверстиях конструкционного эпоксиуглепластика.

Выбран состав эластичного формующего элемента и экспериментально отработаны условия термокомпрессионного уплотнения и отверждения связующего заготовки подкрепляющих стеклопластиковых втулок в отверстиях конструкционного углепластика. Температура, давление и длительность процесса формования составляли соответственно (180±5) °С, 0,6 МПа и (180+10) мин.

Определен эффект подкрепления стеклопластиковыми втулками отверстий в конструкционных эпоксиуглепластиках. Экспериментально определено увеличение несущей способности болтового соединения эпоксиуглепластика со стеклопластиковыми втулками на 15 %, которое подтверждается расчетно-аналитическим методом и компьютерным моделированием конструктивно подобных образцов эпоксиуглепластиков без установки крепежа в отверстиях с упрочненными втулками. где это значение составляет соответственно 27 % и 20-27 %.

Разработаны типовой технологический процесс, технологические рекомендации и составлена методика по назначению оптимальных параметров технологического процесса постановки композитных стеклопластиковых втулок термокомпрессионным методом (в том числе с односторонним подходом), имеющие возможности адаптации под условия как опытного и серийного производства, авиаремонтных предприятий, так и к условиям непосредственных эксплуатантов авиационной техники (например, строевых частей). Выпущена руководящая документация (ТР № 874/1-48-16), предписывающая порядок действий по реализации способа постановки композитных втулок.

Достоверность и обоснованность результатов исследования:

Применение стандартных поверенных и аттестованных средств измерений, использование современных методов исследования, таких как ДСК, ДМА, рентгеновская томография, профилометрия, а также всесторонние исследования большого количества образцов, их метрологическая экспертиза и обеспечение, обеспечивают достоверность и обоснованность результатов исследований.

Личный вклад соискателя:

При участии соискателя спроектированы все экспериментальные образцы, выполнена работа по их изготовлению и испытаниям, соискателем лично спроектирована оснастка для изготовления заливочных образцов, собственноручно изготовлены композитные образцы в результате поперечной пропитки и автоклавного формования, проведена основная часть измерений, проведена отработка технологических режимов и составлена технологическая документация.

Апробация работы:

Основные положения работы и отдельные ее части были представлены и обсуждались на 20 научно-технических конференциях, в т.ч. на 6 всероссийских и 14 международных научно-технических конференциях:

- Всероссийская научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии – НМТ-2012». Москва, 2012 г.;

- Всероссийская конференция по проблемам науки и технологии Межрегионального совета по науке и технологиям, Миасс, 2013 г., 2016 г., 2017 г.;

- Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, РКК «Энергия», Королев, 2014

- Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения». Москва, 2012 г., 2013 г., 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 г.;

- XX и XXI Международные научно-технические конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», ОНПП «Технология», Обнинск, 2013 г., 2016 г.;

- Всероссийские научно-практические конференции с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, 2014 г., 2016 г., 2018 г.;

- XXIV Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова, Москва, 2018 г.;

- IX Международный Аэрокосмический Конгресс, Межд. фонда попечителей МГАТУ. МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 2018.

Выпущены руководящие технические материалы (РТМ) – ТР № 874/1-48-16 по способу постановки стеклопластиковых втулок, Отчет № 882/1-48-16 по изготовлению и испытанию образцов с установленными композитными стеклопластиковыми втулками.

Публикации:

Непосредственно по теме диссертационной работы основные результаты изложены в 27 публикациях, в том числе 5 в изданиях, включенных в перечень ВАК и две зарубежные (в т.ч. индексируемая WoS).

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов по работе, списка использованной литературы из 88 наименований, содержит 79 рисунков, 18 таблиц, изложена на 151 страницах машинописного текста.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Полимерные композиционные материалы, в том числе углепластики на основе эпоксидных матриц, широко применяются при создании изделий в аэрокосмической промышленности, что обусловлено их высокими упруго-прочностными и функциональными удельными характеристиками. Высокий модуль упругости и высокая удельная прочность обеспечивают ПКМ преимущества при эксплуатации ЛА в условиях сложного нагружения. Так интегральные конструкции могут обеспечить существенное снижение массы с одновременным повышением жесткости, прочности и технологичности [1].

Принцип создания новых ПКМ, обладающих высокими удельными прочностью, жесткостью и вязкостью разрушения, основан на армировании матрицы высокопрочными и жесткими волокнами или дисперсными частицами. Однако опыт их применения показывает, что гетерогенная природа композитов и разнообразные технологии изготовления материалов и натурных конструкций служат объективной основой для широчайшего варьирования как статических, так и усталостных свойств композитов и изделий из ник, влияния на их статическую и усталостную прочность более многочисленных, чем для металлических материалов, конструктивно-технологических факторов [2]. Относительная нестабильность технологии производства компонентов ПКМ (например, сырья для изготовления первичных углеродных нитей, процессы трощения жгутов или текстильная переработка листовых форм наполнителей), значительно влияющие на их характеристики, приводит к тому, что уже на стадии изготовления деталей и агрегатов из ПКМ или на ранней эксплуатации в них появляются дефекты и повреждения различной природы, которые вносят существенную неопределенность и неоднозначность в оценке статических и динамических характеристик ПКМ. К тому же, к невозможности создания заведомо

«бездефектных структур», добавляется еще и относительно легкая повреждаемость композитов, например, при ударных воздействиях.

Именно поэтому решение задач, связанных со снижением несущей способности и остаточного ресурса деталей, узлов и агрегатов, содержащих в своем составе композиционные материалы, в связи с зародившимися и развивающимися дефектами, является актуальной проблемой современного авиационного материаловедения и науки о технологии. Общепризнанным является суждение о первоначальной неизбежной дефектности углепластиков и других волокнистых полимерных композиционных материалов. В связи с этим проектирование конструкций ведется с учетом первоначальной дефектности и идеологией работы конструкций с допустимыми дефектами. Вместе с тем, необходимо обеспечивать условия изготовления и эксплуатации конструкций, не приводящими к значительному увеличению размеров дефектов, их количества, т.е. оставлять размеры и количество дефектов в поле допустимых значений в течение всего срока службы изделий при обеспечении заданных коэффициентов запаса прочности авиационных конструкций.

1.1 Современные классификации дефектов и повреждений ПКМ

Дефект или повреждение в конструкции – это состояние конструкции, в котором ее реальные свойства (прочность, ресурс) меньше расчетных.

Наличие и количество дефектов и повреждений являются важнейшими факторами, определяющими надежность изделия авиационной техники.

Приведены основные типы современных классификаций дефектов и повреждений изделий АТ из ПКМ.

1.1.1 Классификация дефектов ПКМ деталей авиационной техники по причинам возникновения

По причинам возникновения дефекты источники, относящиеся к РТМ для применения в войсках, классифицируют на конструкционные, производственные, ремонтные и эксплуатационные, а также транспортирования и хранения.

Конструкционные дефекты являются следствием несовершенства конструкции применительно к условиям ее эксплуатации. Они проявляются на всех или на большинстве изделий данного типа, имеющих близкую наработку, чаще в начальный период эксплуатации авиационной техники или по мере накопления необратимых изменений в материале деталей с более низкими запасами работоспособности.

Конструкционные дефекты устраняются заменой деталей на усиленные, с лучшими эксплуатационными характеристиками в ходе выполнения мероприятий по доработкам АТ, а в ряде случаев – за счет снижения режимов эксплуатации АТ.

Производственные дефекты связаны обычно либо с нарушением установленной технологии (единичные дефекты), либо с неправильным назначением технологии (массовые дефекты) изготовления и ремонта деталей, их контроля, демонтажа и монтажа, низкой технологической культуры и дисциплины, недостаточной подготовки исполнителей. Часто эти дефекты появляются по причине применения неисправного или не по назначению инструмента, приспособлений, а также контрольно-проверочной аппаратуры и проборов, не прошедших метрологическую проверку или не удовлетворяющих требованиям технологии по точности, некондиционности исходных материалов и комплектующих частей.

Производственные дефекты проявляются в различный период эксплуатации, возможно их проявление и одновременно на рядке экземпляров АТ, но только на АТ, изготовленной или отремонтированной в определенный период времени на данном предприятии, части, мастерской, где имелось временное или разовое

нарушение технологии. Систематические массовые дефекты, связанные с неправильным назначением технологии, имеют место на АТ, изготовленной или отремонтированной всеми предприятиями (обычно в период освоения новой АТ), применяющими эту технологию.

Предупреждение этих дефектов достигается путем повышения квалификации исполнителей, тщательного входного контроля на соответствие требованиям НТД материалов и комплектующих частей, контроля операций ремонта и испытаний АТ и применяемого при этом оборудования, внедрения передовых технологий ремонта, методов контроля и испытаний АТ.

Эксплуатационные дефекты являются следствием нарушения правил технического обслуживания и эксплуатации АТ на земле и в воздухе, невыполнения требований единых регламентов технической эксплуатации. К ним относятся: нарушение сроков и некачественное выполнение регламентных и ремонтных (мелких, текущих) работ, правил заправки топливом, жидкостями и зарядки газами, монтажа, регулировки и особенно ухода в эксплуатации, слабый контроль за состоянием лакокрасочных покрытий и за предупреждением попадания или оставления посторонних предметов, нарушение режимов работы, превышение допустимых нагрузок в полете и при посадках и ряд других.

Все это создает условия для ускоренного воздействия на детали различных разрушительных процессов, а также появления в ряде случаев внезапных дефектов и связанных с ними отказов и создания аварийной обстановки, в результате которой возникают дополнительные аварийные дефекты в виде разрушений, деформаций, трещин, обгораний, перегрева, заеданий и т.д.

Дефекты транспортирования и хранения возникают в результате нарушения установленных на это правил.

Дефекты естественного изменения технического состояния деталей АТ («естественные» дефекты) возникают как результат закономерного (относительного медленного) воздействия на них различных по физической

природе естественных разрушительных процессов. Эти дефекты возникают в процессе нормальной эксплуатации АТ. Их необходимо отличать от дефектов эксплуатационных, вызванных нарушениями правил эксплуатации, хранения и транспортирования АТ, т.е. связанных с человеческим фактором.

К эксплуатационным дефектам относят и один из наиболее распространенных видов внешнего воздействия – изнашивания деталей из ПКМ при трении. изнашивание при трении есть процесс разрушения и отделения материала с поверхностей детали и накопления в нем остаточных деформаций, проявляющихся в постепенном изменении размеров и формы детали. Результатом этого процесса является дефект в виде износа, величина которого при дефектации деталей выражается в единицах изменения их диаметра, толщины и т.д.

Изнашиванию при трении подвергаются как подвижные детали, так и собранные неподвижно, в т.ч. элементы болтовых и заклепочных соединений. К таким дефектам можно отнести износ, например, овализацию отверстий под механический крепеж.

К эксплуатационным дефектам и повреждения относят также боевые повреждения, то есть дефекты АТ, возникающие в результате воздействия средств поражения. Стойкость к боевым повреждениям определяется таким понятием, как боевая живучесть конструкции. Вторичные повреждения, возникшие по причине боевых повреждений возможно рассматривать в рамках классификации эксплуатационных повреждений, то есть далее действовать с ними, как с эксплуатационными повреждениями.

1.1.2 Классификация эксплуатационных дефектов в соответствии с РТМ ремонта и обслуживания АТ в войсках по признаку нахождения в зоне крепежа или вне ее

Характерными дефектами и повреждениями элементов конструкций из ПКМ являются:

1) в зоне механических соединений:

- скалывая верхних слоев ПКМ;

- выкрашивание связующего (матрицы) около элементов креплений;

- поверхностные трещины на деталях;

- подмятия, расслоения, выпучивания ПКМ;

- врезания закладных головок, головок болтов и шайб в ПКМ;

- нарушения геометрии соединения;

- нарушения ЛКП;

2) вне зоны соединений:

- поверхностные царапины;

- расслоения (отслоения), трещины;

- проколы, пробоины, надрезы;

- сколы ПКМ и расслоения по кромкам агрегатов;

- нарушения ЛКП и др.

Если на агрегате имеется группа небольших дефектов прощадью до 4…5 см^2 каждый, расположенных относительно друг друга ближе $3L_{max}$, где L_{max} – наибольший размер повреждения, то эта группа считается за один дефект площадью, равной площади участка, на котором расположены дефекты.

1.2 Данные по влиянию отверстий и дефектов в них на остаточную прочность эпоксиуглепластиков и несущих конструкций на их основе

Сами по себе отверстия, выполненные в эпоксидных углепластиках, как и в других типах ПКМ, существенно ослабляют конструкцию. Несущая способность углепластиков и механических точечных соединений (болтовых, заклопочных) деталей их них в основном определяется уровнем концентрации напряжений около отверстий.

Так, коэффициент концентрации напряжений (ККН) в образце из углепластика (рисунок 1.1) больше, чем в аналогичном металлическом образце, прежде всего вследствие отсутствия пластической деформации и ярко выраженной анизотропии механических свойств ПКМ [3].

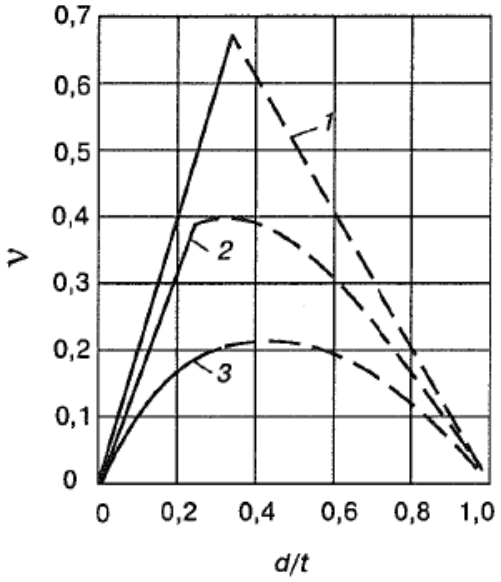


Рисунок 1.1 - Зависимость относительной прочности ν болтовых соединений податливого металла «1», волокнистого ПКМ «2» и хрупкого материала «3» от отношения диаметра d болта к ширине t пластинки: (—) – разрушение в результате смятия; (- - -) – разрушение в результате разрыва [3 - 4].

В частности, в отличие от изотропных металлических материалов, как показывают проведенные исследования, в неоднородных анизотропных материалах целесообразно выделить два рода напряжений – напряжения в структуре материала, возникающие вследствие взаимодействия жесткого углеродного наполнителя и сравнительно «мягкого» полимерного связующего, и средние напряжения, распределение которых обусловлено геометрией рассматриваемого изделия, в том числе сбалансированности и симметричности схем армирования деталей по толщине изделия. Поэтому в углепластиках (как и во многих композитах другой природы) концентрация средних напряжений (рисунок 1.2), возникающая вследствие наличия отверстия, выточек и галтелей в детали, накладывается на возмущение в напряженном состоянии в самом материале [5].

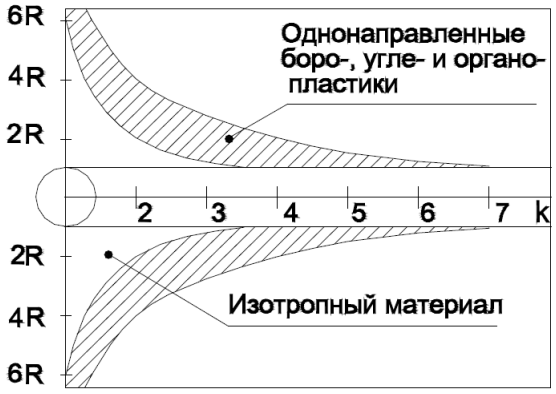


Рисунок 1.2 – Увеличение ККН в зависимости от природы и анизотропии материалов [6]

Исследования ученых показывают, что ККН анизотропных углепластиках на основе тканых наполнителей увеличивается при наличии в отверстиях крепежных элементов. Так, разрушение образцов, в которых сделаны отверстия, происходит при напряжениях, равных 60-70 % от прочности при растяжении целого образца, а после установки крепежных элементов – при напряжениях, составляющих 40 – 50 % от прочности [3, 6 - 9].

По сравнению с изгибом и сжатием, растяжение является наиболее опасной деформацией. При действии на соединение растягивающей нагрузки может произойти разрушение материала по линии крепежа, срез по площадкам, параллельным приложенной нагрузке, в направлении от отверстия к кромке детали, а также смятие стержнем крепежа, что приводит к увеличению диаметра отверстия и выворачиванию крепежа. При нагружении вдоль волокон (например в углепластике) разрушение может произойти в результате раскалывания материала. Как отмечается в источниках, наибольшая прочность соединения при растяжении достигается в том случае, когда при заданных параметрах механического крепления равновероятны смятие материала стержнем болта и его разрыв по ослабленному сечению [7].

Однако исследования, проведенные в ряде работ показывают, что соотношение между допустимыми напряжениями на смятие, растяжение и срез в соединениях из ПКМ не столь благоприятны, как в соединениях конструкций из однородного материала [3].

При всех случаях нагружения конструкции в зоне стыка регулярной части (постоянной по составу структуры ПКМ) со смежной конструкцией возникают локальные концентрации напряжений, показанные на рисунке 1.3, как сгущения линий тока силовых полей напряжения растяжения – сжатия.

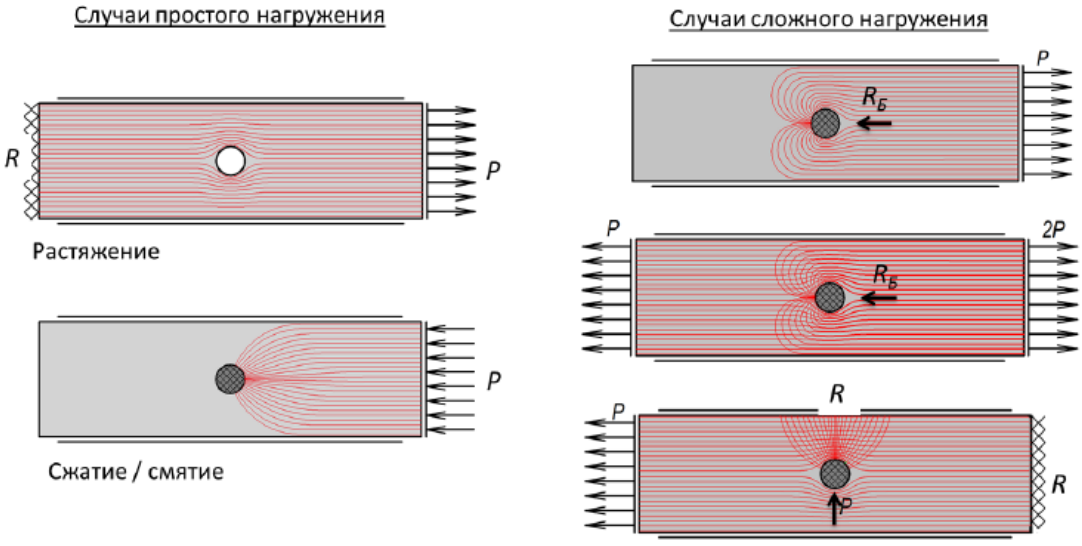


Рисунок 1.3 – Схемы силовых потоков при различных случаях нагружения [10]

Искривление линий тока (светлые треугольники вблизи отверстий) свидетельствуют о появлении в слоях поперечных напряжений расщепления волокон, что может явиться причиной начала разрушения ПКМ, особенно при переменных нагрузках [10].

Причины появления концентрации напряжений в зоне крепежа различные.

Во-первых, потеря площади сечения из-за наличия отверстий, что требует увеличения толщины КМ в стыковой зоне в 1,2…1,33 раза ($К_Г$ =f(D/h = 1,2…1,33) для равнопрочности с регулярной частью.

Во-вторых, у отверстий в слоях КМ появляются локальные концентрации напряжений растяжения-сжатия $К_0$ КМ=1,58…2,24, зависящие от структуры КМ (таблица 1.1, рисунок 1.4) и также приводящие к необходимости увеличения толщины КМ в стыке.

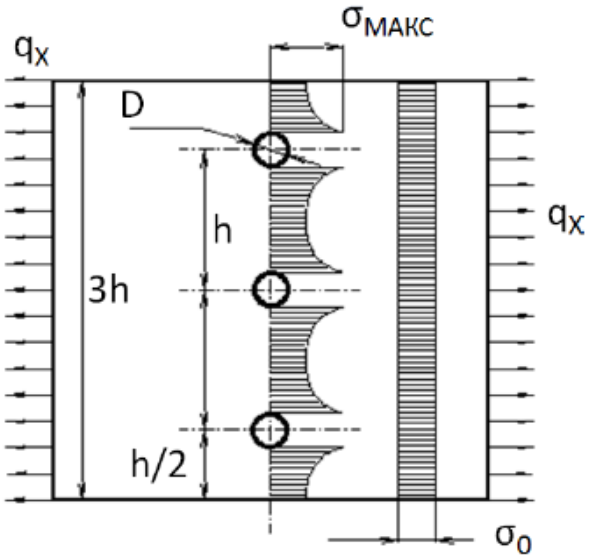


Рисунок 1.4 – Схема распределений механических напряжений в зоне отверстий [10]

Таблица 1.1 – Значения ККН в зависимости от схем армирования для конструкционного углепластика [10]

	Соотношение D/h

Схема армирования детали из углепластика, % [0 °, ± 45 °, 90 °]	0,1	0,3	0,5
[80; 10; 10]	2,76	2,85	3,15
[50; 40; 10]	2,51	2,62	2,97
[10; 80; 10]	2,22	2,35	2,75

В-третьих – самое значимое – в зоне контакта появляются локальные напряжения смятия, нагружающие матрицу и расщепляющие волокна КМ силой от крепежного элемента, рисунки 1.5 – 1.7.

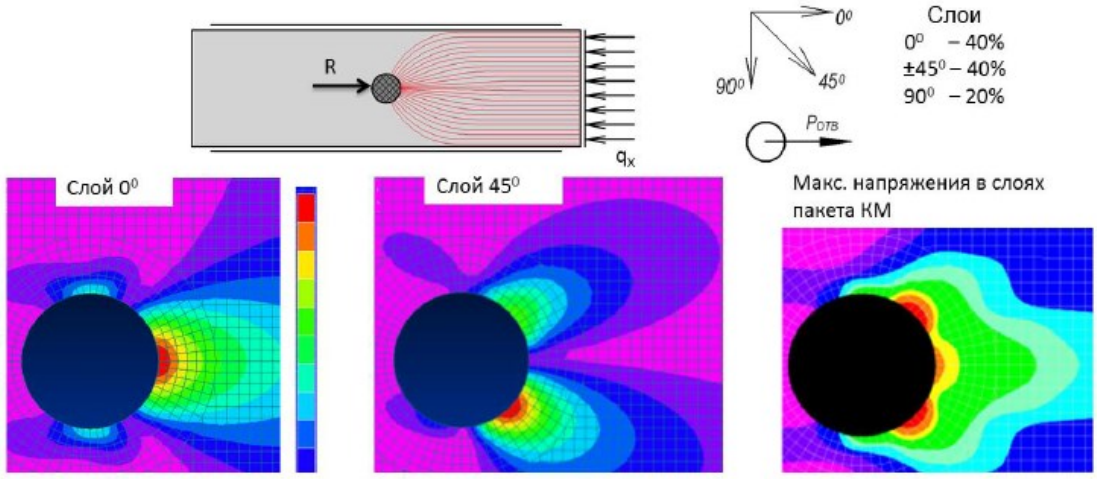
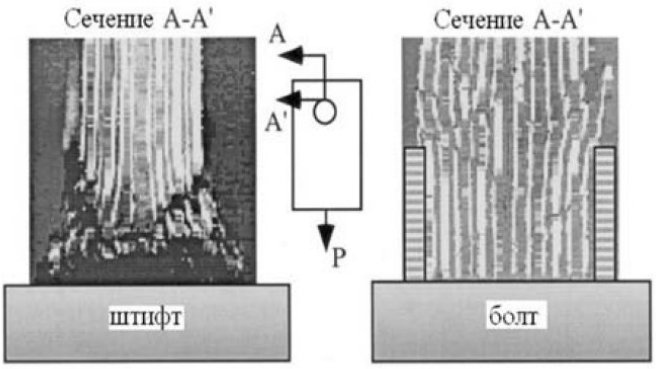


Рисунок 1.5 – Напряжения в слоях пакета в зависимости от схемы армирования от усилий смятия под крепежом [10]

Механизм нагружения отвержденной матрицы композита и расщепление слоев показаны на рисунке при смятии крепежа как в плоскости слоев, так и в поперечном направлении.



а) *б)*

Рисунок – 1.6 - Характер разрушения углепластика при смятии:

а – разрушение матрицы и расщепление слоистого материала; б – сдвиг волокон при затяжке болтом [11 - 13]

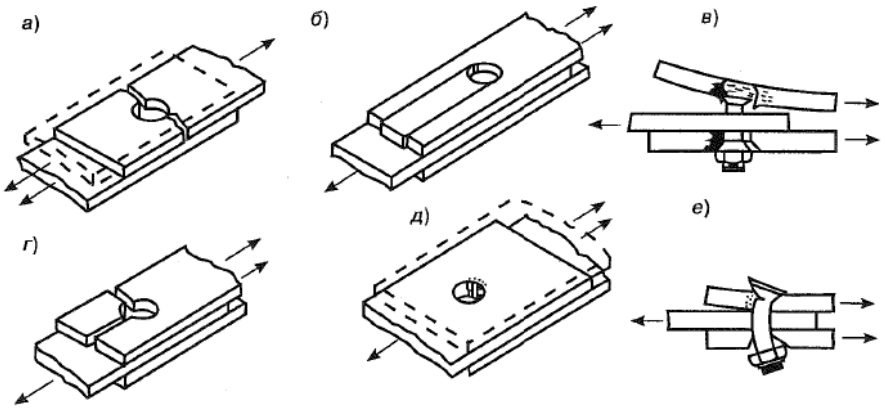


Рисунок 1.7 – Виды разрушений при растяжении болтовых и заклепочных соединений деталей из конструкционных углепластиков [8]

В литературе встречаются данные, подтверждающие, что концентрация напряжений значительно влияет и на динамическую прочность композитов (рисунок 1.8)

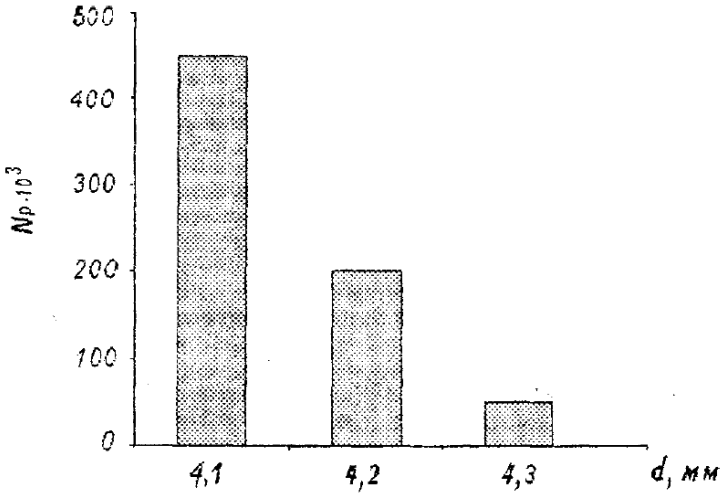


Рисунок 1.8 – Влияние диаметра отверстия под крепежный элемент на долговечность соединения для эпоксидного углепластика [3]

Помимо увеличения концентрации напряжений при образовании отверстий, что очевидно снижает несущую способность конструкций из ПКМ, часто сам процесс механической обработки в целях получения отверстий наносит первичные повреждения материалу, которые впоследствии перерастают в значительные дефекты. Данные дефекты по классификациям, данным в п. 1.1.2 (дефекты в зоне механических соединений) настоящей главы, будут отнесены с большей вероятностью к эксплуатационным дефектам, несмотря на то, что первичное их зарождение вероятно возникло на этапе изготовления (производственная природа), критическое развитие они могут получить, например, при ударных воздействиях. Влияние дефектов вблизи отверстий на распределение механических напряжений показано на эпюре на рисунке 1.9.

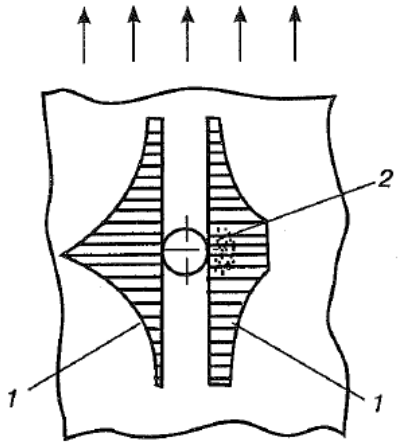


Рисунок 1.9 – Концентрация механических напряжений в зоне, примыкающей к отверстию в конструкционном углепластике при отсутствии (эпюра слева – 1) и при наличии дефекта 2 (эпюра справа) [7]

Приведены данные [14] по снижению прочности образцов из углепластика с отверстиями, подвергнутые также нанесению ударных дефектов (сквозная пробоина – для образцов на растяжение, расслоение для образцов на сжатие):

1 Смешанная (квазиизотропная) укладка, скорость V < 35 м/с. Тип дефекта – вмятина. Падение несущей способности при растяжении до уровня 68 – 86 % от расчетного без дефекта;

2 Укладка 0, ±45, 40<V<100 м/с, при растяжении – 62 – 80 % от расчетного без дефекта;

3 Укладка 0, 90, 40<V<100 м/с, при растяжении – 31 – 61 %, при сжатии – 30 – 45 % от расчетного уровня.

К важным факторам, влияющим на возникновение дефектов, безусловно относят выбор и использование метода образования отверстий. Отверстия в деталях выполняются сверлением, зенкерованием, развертыванием, растачиванием, шлифованием, протягиванием, а также другими способами в зависимости от требуемых точности, шероховатости поверхности, а также

конфигурации детали [15 - 16]. На рисунке 1.10 приведены примеры результатов механической обработки армированных пластиков с использованием различного режущего инструмента.

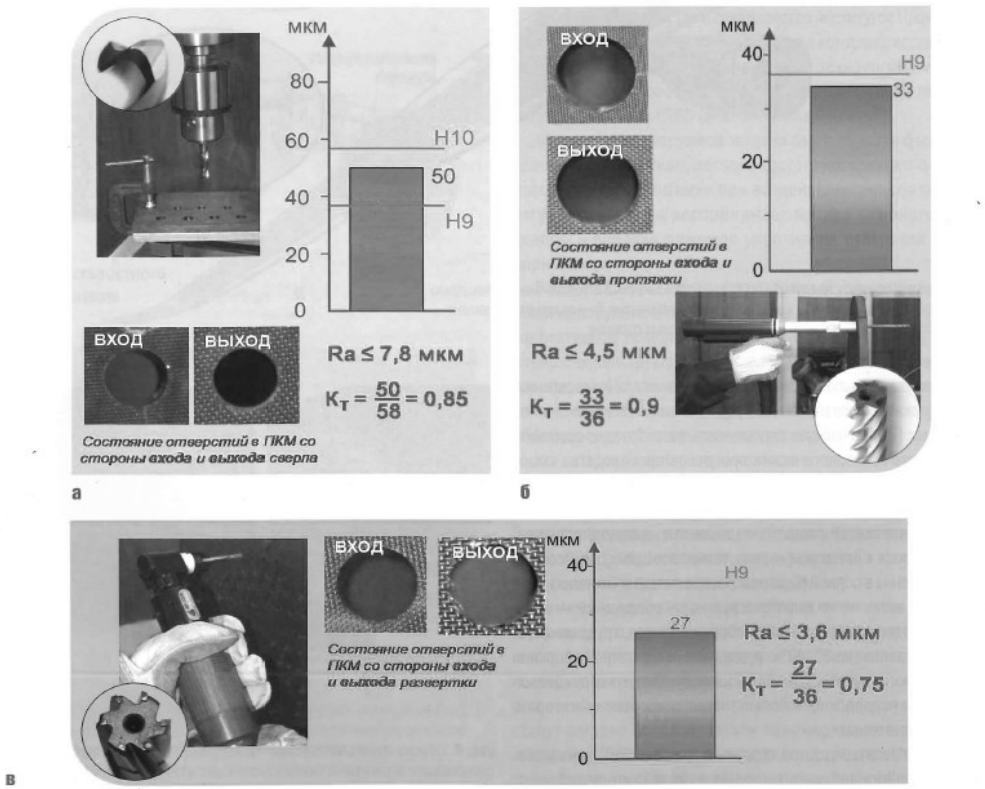


Рисунок 1.10 – Исследование стабильности технологических процессов и точности отверстий под болты [15]: а – обработка сверлением; б – обработка сверлением с последующим протягиванием; в – обработка сверлением с последующим развертыванием

Например, имеются данные (рисунок 1.11), что в зависимости от типа механической обработки при образовании отверстий, значительно могут зависеть усталостные характеристики материала в конструкции из ПКМ.

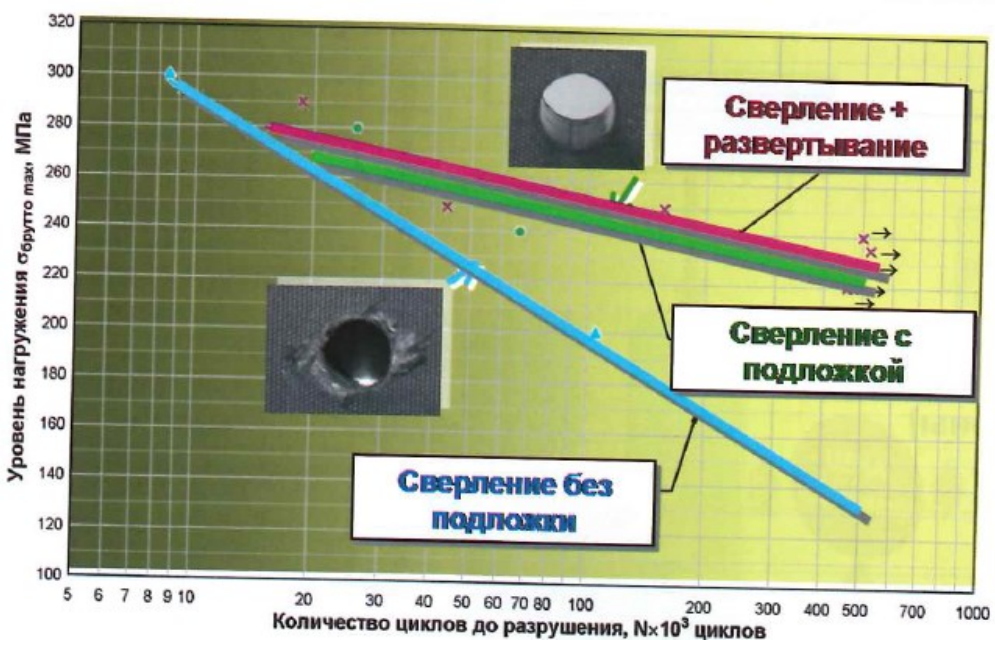


Рисунок 1.11 – Экспериментальные данные о влиянии методов механической обработки на усталостную выносливость углепластиков [15]

Износ инструмента, который впрямую влияет на качество и точность образованных отверстий как фактор, влияющий на долговечность соединений углепластиков рассматривается в [3], данные показаны на зависимости на рисунке 1.12.

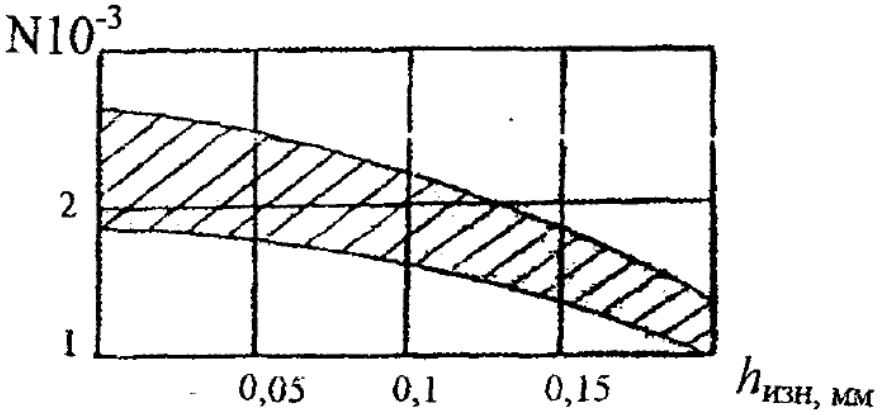


Рисунок 1.12 – Влияние износа сверл как рабочего инструмента при механической обработке при образовании крепежных отверстий в конструкционных углепластиках на их долговечность в составе механических соединений [3]

Таким образом при анализе источников показано, что само по себе образование отверстий повышает концентрацию напряжений, причем в большей степени для анизотропных структур, какими являются углепластики (чем ККН для металлических материалов), большую роль при этом играет образование дефектов вблизи контуров отверстий, и еще большее в связи с этим снижение несущей способности деталей и агрегатов.

1.3 Современное состояние вопроса образования отверстий в авиационной промышленности и сборки изделий и агрегатов из ПКМ

На данный момент основным способом образования отверстий, предназначенных для создания крепежных соединений и узлов, в современной авиационной и космической промышленности, является механическая обработка. В частности, для полимерных композитов конструкционного и функционального назначения среди применяемых методов образования отверстий: сверления, зенкерования, развертывания, растачивания, шлифования, протягивания [3, 14 - 16], наиболее часто применяются сверление и развертывание. В то же время, известно, что для полимерных композиционных материалов, а особо для волокнистых ПКМ, наполненных длинноволокнистыми наполнителями, образование отверстий с помощью локального удаления материала, резко снижает процент реализации высоких упруго-прочностных свойств композитов, как материала, так и конструкции в целом. Прежде всего это связано как с нарушением сплошности системы «матрица – наполнитель», так и «перерезанием» нитей основы, направленных как правило вдоль силовых полей механических нагружений конструкции в целом.

С этой точки зрения, предпочтительно закладывать образование отверстий на этапе формообразования и формования пластиков. Существует достаточно много примеров такого подхода, например, использование при формовании специальной

формообразующей оснастки, содержащей в своем составе знаки, которые оформляют контуры отверстий, обеспечивают необходимый уровень качества внутренней поверхности отверстий, обеспечивают высокие показатели повторяемости изделий при изготовлении. Данный подход наиболее применим, однако, для изделий, изготавливаемых из литьевых пластиков, пресс-материалов (в т.ч. дисперсно армированных). Для пластиков, наполненных длинноволокнистыми наполнителями, наиболее удачным примером являются изделия, получаемые методом намотки с применением намоточных видов оборудования, в программу которых имеется возможность задать функцию «обхода» отверстий (например, по знакам) – т.е. образование самого отверстия происходит на этапе формообразования для последующего формования пластика (рисунок 1.13).

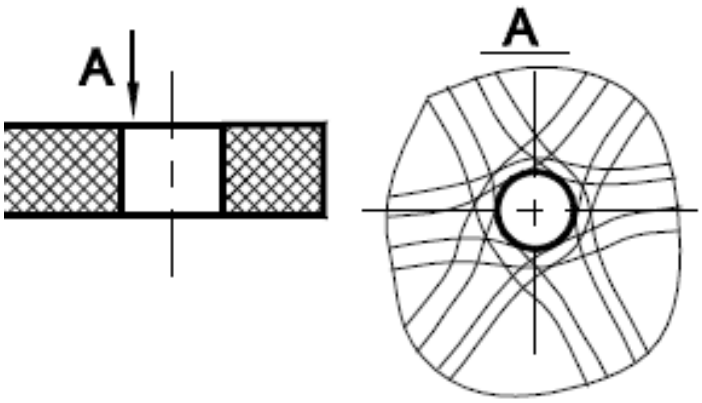


Рисунок 1.13 - Пример применения намоточных способов формообразования при изготовлении композитных деталей. Образование отверстия заложено в программу намотки [6]

Помимо знаков, могут применяться и закладные элементы, например, в виде гладких (рисунки 1.14 – 1.15) или резьбовых втулок (рисунок 1.16).

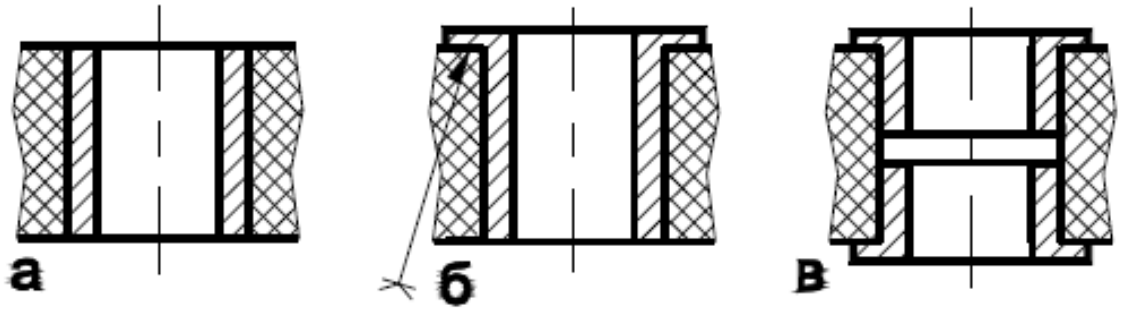


Рисунок 1.14 – Конструктивные исполнения закладных элементов в виде гладких втулок, обеспечивающих образование отверстий под крепеж в композитных агрегатах [6]:

а – цилиндрический симметричный гладкий закладной элемент; б – гладкий закладной элемент с односторонней завальцовкой; в – гладкий составной закладной элемент с завальцовкой

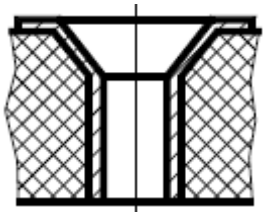


Рисунок 1.15 – Исполнение гладкого закладного элемента с конусной частью по потайную головку крепежного элемента [6]

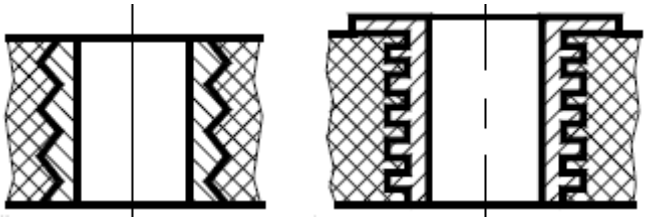


Рисунок 1.16 – Пример исполнения резьбовых закладных элементов [6]

Известно о примерах применения закладных металлических игольчатых шайб в ракетно-космической и авиационной промышленности. В частности, известно о существовании метода «раздвижки волокон препрега» [14, 16]. Примером его реализации служит такой порядок технологических операций:

- выкладка пакета-заготовки из полуфабрикатов углепластика в виде препрегов в соответствии с указанной в конструкторской документации схемой укладки слоев;

- выполнение предварительных подпрессовок, в том числе при повышенных температурах, но не достигающих температур начала полимеризации, в целях предварительного уплотнения пакетов-заготовок;

- операция «раздвижки волокон наполнителя», выполняемая специальным инструментом в виде вращающихся и подводимых через кондукторы отверстий остро заточенные штыри с заданной конусностью;

- установка технологических знаков в образованные в заготовках отверстия;

- формование с последующим удалением знаков.

Имеются сведения [14, 16], что данный метод позволяет добиться существенного увеличения несущей способности деталей, содержащих отверстия: например, известно о результатах для углепластика типа КМУ: при растяжении образцы из углепластика имеют несущую способность выше в 1,3 – 1,6 раз по сравнению с образцами, где отверстия выполнены сверлением; при сравнении конструкций из углепластика с отверстиями, выполненными данным методом, с конструкциями из дюралюмина Д19АТ, содержащих отверстия, выполненные сверлением, то с учетом удельных весов данных материалов, эффективность применения углепластика выше таковой дюралюмина в 2 раза (рисунок 1.17).

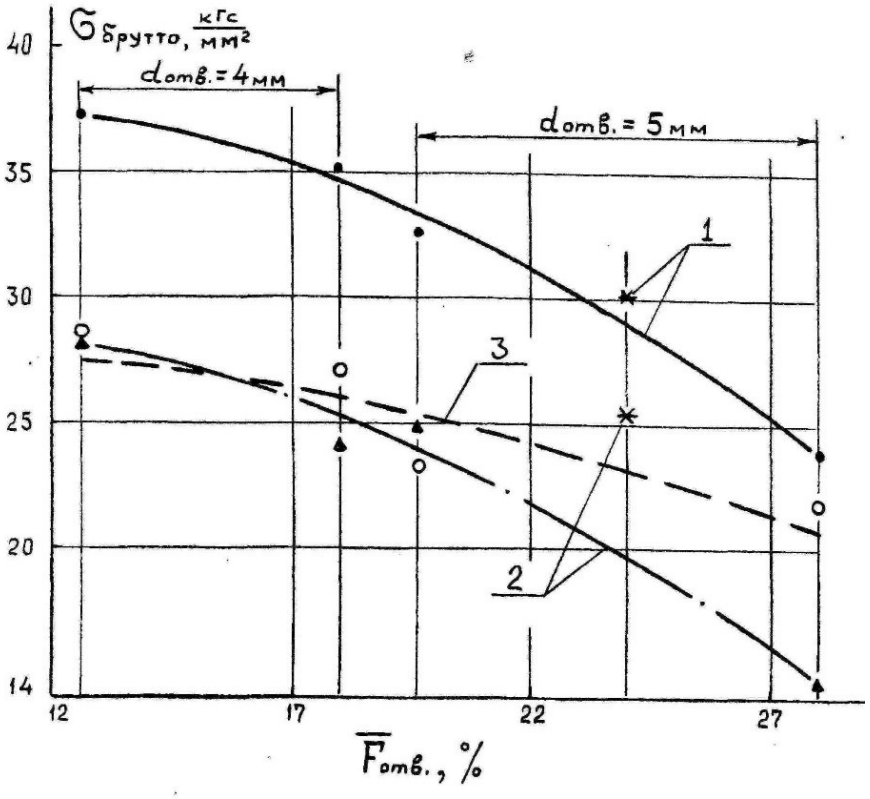


Рисунок 1.17 – Зависимости несущей способности при растяжении образцов от относительной площади отверстий $F_{отв}$ для исполнений и материалов [14, 16]:

●, ✱, Δ - углепластик; **O** - дюралюмин; 1 – «раздвижка волокон»; 2, 3 – сверление; ✱ - расположение отверстий в ряды; ●, **O**, Δ – расположение отверстий в шахматном порядке

Несмотря на показанную эффективность данного метода в эксплуатационном плане, он имеет серьезные недостатки в технологическом – это и существенное усложнение технологического процесса, введение дополнительной неосвоенной в промышленности операции «раздвижки волокон», к тому же трудно реализуемой с точки зрения высокой повторяемости процесса раздвижки, что в конечном счете повлияет на качество и невысокую повторяемость механических свойств (без специальных мероприятий каждая новая «раздвижка» по-своему индивидуально разведет мононити в составе наполнителя между собой). Также необходимо отметить, что волокна, удаляемые из зоны отверстия, перемещаются в соседнюю зону, создавая там их неравномерный избыток, поэтому структуру композиционного материала, изготавливаемого с применением данного метода

также нельзя считать оптимальной: возможно появление «вздыбленности» рядом с отверстием, особенно при относительно больших толщинах пластика, при удалении этих «вздыбленностей» методами механической обработки – волокна опять окажутся перерезанными.

Достаточно широко известен подход применения так называемых высокомодульных и низкомодульных стопперов (ВМС и НМС), позволяющих изменить характер распределения механических напряжений в композитных конструкциях [6, 14]. Подход предусматривает применение таких конструктивно-технических решений, которые локализовали или замедляли бы рост трещин. Для этого применяются стопперы, формируемые путем местного изменения жесткости КМ и вязкости разрушения.

Функция НМС (смягчающей полосы) заключается в том, чтобы создать зону низких напряжений с достаточной вязкостью разрушения для превращения имеющейся трещины в некритическую. Такие стопперы формируют путем замены на дискретных участках высокомодульных слоев основного материала (углепластика), ориентированных под углом 0 °, на слои низкомодульного материала, в качестве которых можно использовать структуры ±45 ° из того же основного материала или укладку 0 ° из ПКМ с более низким модулем упругости (стекло- или органопластики) (рисунок 1.18). Например, использование однонаправленного стеклопластика в качестве стоппера в углепластиковой панели повышает прочность поврежденной панели в 3 раза по сравнению с образцами без стопперов, а структуры ±45 ° из углепластика – в 1,5 раза [6, 14].

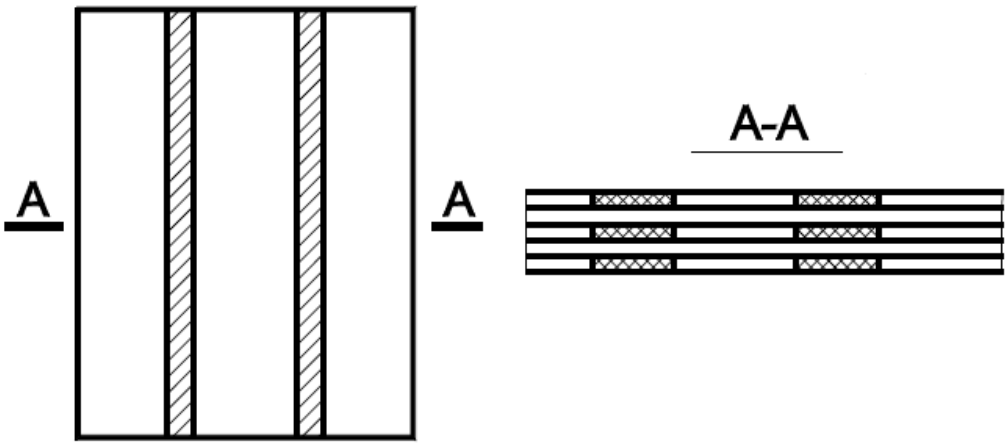


Рисунок 1.18 – Пример формирования слоев НМС в конструкционном материале высокой жесткости (углепластике) [6]

Высокомодульные стопперы применяются в тех случаях, когда основной материал имеет относительно низкий модуль упругости и воспринимает в основном сдвиговые усилия. В таком КТР большая часть осевой нагрузки воспринимается высокомодульными элементами (стопперами), что снижает концентрацию механических напряжений у кончика трещины в основном материале и предотвращает ее страгивание.

Высокомодульные стопперы формируют путем замены на дискретных участках слоев 0 ° основного материала на более прочные высокомодульные слои 0 ° из другого композита, приклейкой однонаправленных полос (рисунок 1.19, вариант 1), вкладывания однонаправленных слоев между слоями основного ПКМ (рисунок 1.19, вариант 2). Кроме того, роль ВМС могут выполнять стрингеры, лонжероны, нервюры и т.п. Углы армирования волокон в стопперах выбираются в результате определения напряженно-деформированного состояния детали [6].

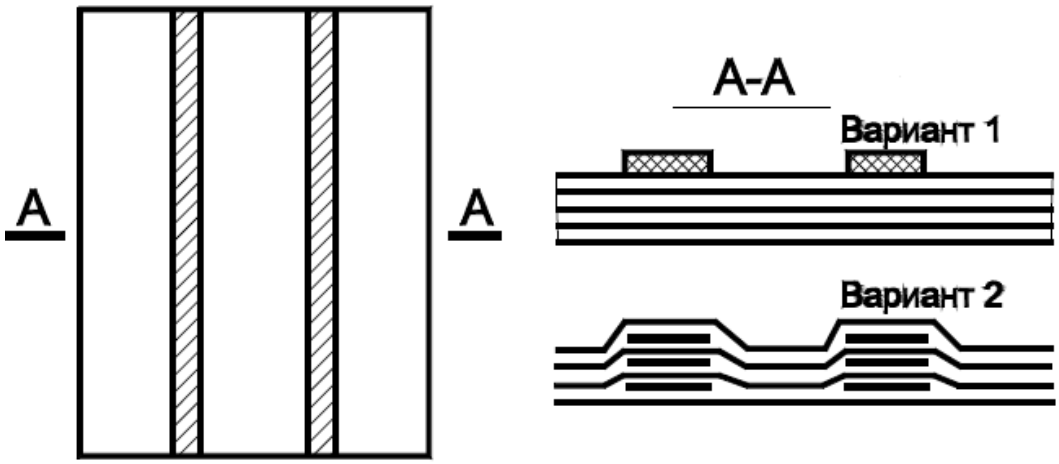


Рисунок 1.19 - Примеры формирования слоев ВМС [6]

Вариант 1 – Совмещение с однонаправленными полосами;

Вариант 2 – Вкладывание или дискретная замена на более жесткие высокомодульные слои 0 °

В качестве конкретного примера применения ВМС приводится использование полос из бороластика в элементах горизонтального и вертикального стабилизаторов американского стратегического бомбардировщика B-1 [14], примеры управлением пути развития трещины в агрегатах самолетов DC-8, DC-10, Boeing 707 (рисунки 1.20 – 1.21).

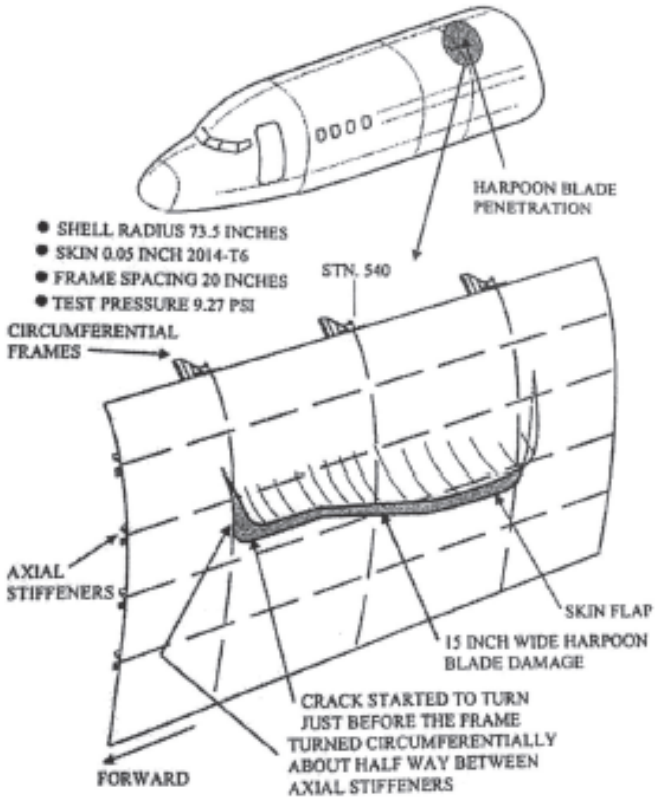


Рисунок 1.20 – «Поворот трещины» в панели фюзеляжа самолета DC с помощью стопперов [17 - 18]

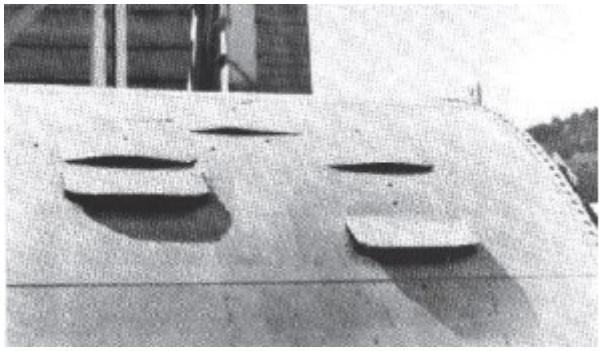


Рисунок 1.21 – «Поворот трещины» в панели фюзеляжа Boeing 707 [17 - 18]

Поворот усталостной трещины в данном случае рассматривается как потенциально важный механизм при обеспечении живучести герметических фюзеляжей [18 - 21].

Еще одним известным конструктивным приемом, снижающим влияние отверстий и дефектных зон вблизи них, является применение так называемых

деконцентраторов напряжений (рисунок 1.22). Это дополнительные «ослабления», наносимые вблизи основного концентратора – отверстия малого диаметра, расположенные вдоль силового потока.

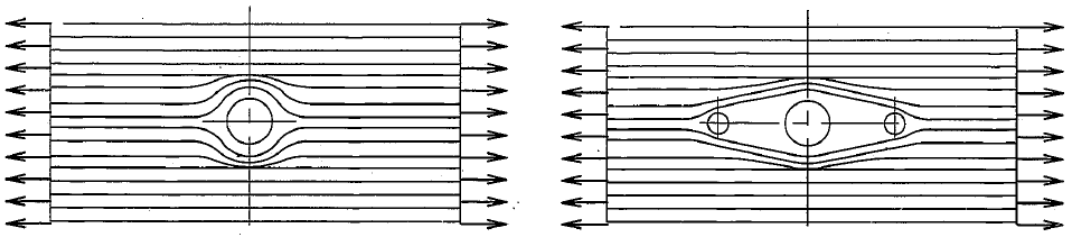


Рисунок 1.22 – Пример использования деконцентраторов и их влияние на силовые токи

К деконцентраторам иногда ошибочно относят местные уплотнения материала ослабленных участков с помощью «выдавок», наносимых чеканами. Назначение деконцентраторов – спрямить силовой поток, а «выдавок» - упрочить материал созданием в нем остаточных напряжений сжатия и располагать его следует в фокусе концентрации (например, дорнирование для металлических материалов). Ко второму подходу можно отнести следующий способ повышения несущей способности механического точечного соединения ПКМ в виде подкрепления стенок отверстия элементами в виде втулок и колец из однородных материалов, устанавливаемых между болтом и стенкой отверстия [22 - 26]. Так, разработан способ постановки металлической втулки, заключающийся в осевом пластическом сжатии подкрепляющего элемента. В процессе осуществления сжатия внутренний диаметр втулки остается неизменным, а по внешнему диаметру осуществляется локальная раздача совместно с соответствующими участками заготовки с образованием на границе соединения переменного поля радиальных сжимающих напряжений [23] (рисунок 1.23).

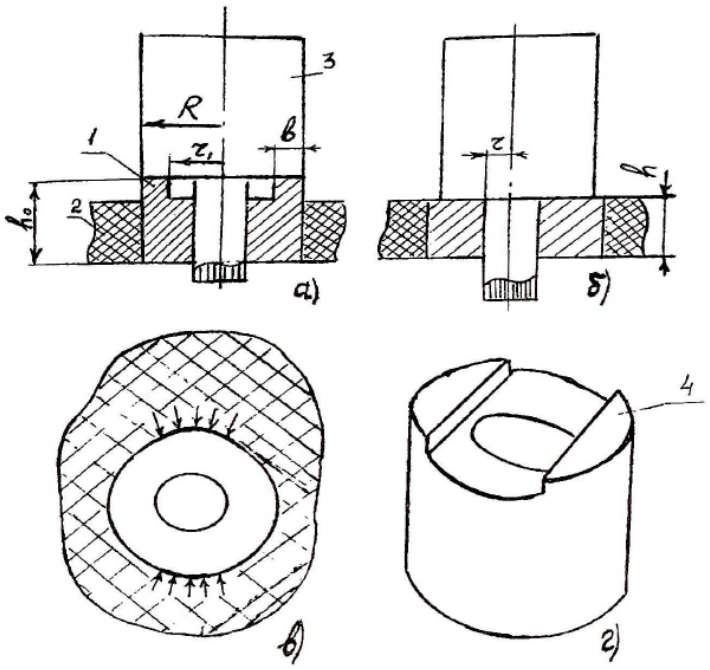


Рисунок 1.23 – Схема способа постановки подкрепляющей втулки [23]:

1 – подкрепляющая металлическая втулка; 2 – листовая заготовка; 3 – ступенчатый пуансон; 4 – выступы на торце втулки

Форма выступов в методе в виде сегмента выбрана в связи с тем, что осадка подобных выступов дает переменное убывающее поле радиальных сжимающих напряжений на границе отверстия в заготовке [26 - 29]. Утверждается, что подкрепляющий элемента позволяет не только снизить концентрацию напряжений на границе отверстия за счет перераспределения напряжений, но и повысить разрушающее напряжение соединение на смятие, обеспечить стабильность осевой затяжки соединения.

В работе [28] показано, что в местах, где в конструкциях из ПКМ были установлены крепежные элементы из металлических сплавов (заклепочные соединения), возникают внешние и подповерхностные повреждения в виде сколов и трещин. Также авторы отмечают, что кроме основного композита наблюдаются разрушение и сколы ЛКП, что ведет к возникновению электрохимической коррозии – следовательно к снижению прочностных характеристик агрегата приводят влияние технологических и природно-климатических факторов. Авторы

в работе [30 - 31] предлагают применение специальной углепластиковой гибридной заклепки (рисунок 1.24).

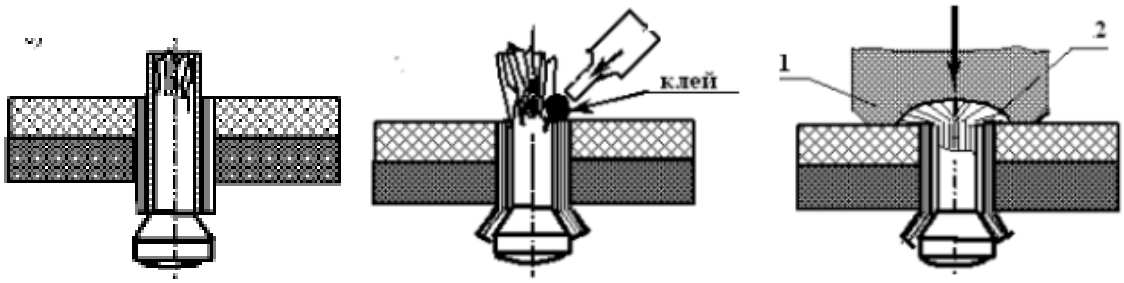


Рисунок 1.24 – Схема установки гибридной углепластиковой втулки [30]

1 – Пуансон; 2 – Замыкающая головка

Метод подразумевает применение клея холодного отверждения ВК-9, имеющего ограниченную теплостойкость.

Принимая во внимание современное состояние науки о сборочном производстве и ее требований к деталям и агрегатам, поступающим на сборку в авиационной промышленности, а также сложность обеспечения точности положения отверстий (соосности) в сопрягаемых и соединяемых деталях с помощью относительно простых оснастки и приспособлений и накапливающихся погрешностей изготовления деталей из материалов разной природы и различными методами, одним из главных требований является во многих случаях требование совместного образования отверстий.

Достаточно также отметить, что трудоемкость именно сверлильных операций на некоторых изделиях достигает 70 – 80 % от общей трудоемкости процессов механической обработки.

Таким образом, при невозможности при современных требованиях сборочного производства отказаться от операций образования отверстий методами механической обработки, также необходимо содержать количество дефектов, приобретаемых изделием на этом этапе, в поле допустимых значений. Так как конструкция самолета рассматривается, как совокупность критических зон,

результат разрушения которых может привести к аварийной ситуации. Зоны конструкции объекта, отказ которых приводит к аварийной (катастрофической) ситуации, к длительным ремонтно-восстановительным работам, или к выводу данного самолета из строя, называют ресурсоограничивающими зонами силовой конструкции или критическими зонами. С этой целью на изделиях АТ для ответственных и особо ответственных узлов происходит формирование перечней ресурсоограничивающих зон, для которых с повышенной долей ответственности должны выполняться определенные контрольные мероприятия. Перечень критических зон конструкции содержит данные о материалах, из которых изготовлены элементы, требования к качеству изготовления, а также учитывается классификация силовых элементов по степени опасности их разрушения. Для особо ответственных элементов конструкции устанавливаются более жесткие требования к изготовлению, эксплуатации, установлению допустимых наработок и контролю. Например, для перспективного боевого истребителя, в котором широчайшим образом применены конструкционные высокопрочные углепластики, можно назвать в качестве примеров несколько агрегатов, содержащих ресурсоограничивающие зоны:

- верхняя панель отъемной части крыла;
- нижняя панель отъемной части крыла;
- верхние и нижние панели средней части фюзеляжа;
- панели хвостовой части фюзеляжа.

При анализе имеющихся в открытом доступе данных о количестве дефектов по мере начала эксплуатации боевых истребителей, а также продолжения испытаний статических машин (наземных стендов), можно сделать вывод, что в зоне высокоресурсного крепежа (большинство из них – болты диаметром 6 мм, выходящие на внешний теоретический контур) повышена вероятность зарождения и развития дефектов типа межслоевая несплошность, зародившаяся на этапе сборки композитных агрегатов с элементами каркаса. Известно о достаточном

количестве случаев объединения двух соседних расслоений в одно с последующим прекращением роста.

Все вышесказанное подтверждает, что еще достаточно длительное время решение проблем образования отверстий в полимерных композитах способами механической обработки будет крайне актуальным. В указанных условиях, даже с учетом «неоптимальных нарушений сплошности системы «матрица – наполнитель» и перерезания направленных волокон наполнителя, стоит проблема изыскания возможностей минимальной дефектности пластика в зонах вблизи отверстий в результате механической обработки и поиска путей снижения количества микроповреждений пластика, а также максимального «залечивания» уже имеющихся микроповреждений.

Выводы по первой главе

Полимерные композиционные материалы, в том числе углепластики на основе эпоксидных матриц, широко применяются при создании изделий в аэрокосмической промышленности, что обусловлено их высокими упруго-прочностными и функциональными удельными характеристиками. Но вместе с тем, особенности структуры полимерных композитов, прежде всего гетерогенность и ярко выраженная анизотропия свойств, обуславливают особую чувствительность ПКМ к дефектам и повреждениям различной природы, влияющие непосредственно на надежность и безопасность эксплуатации деталей, узлов и агрегатов из ПКМ в составе АТ. Приведены основные классификации дефектов и повреждений ПКМ, в т.ч. в связи с наличием отверстий под крепежные элементы, показано, что отверстия под крепеж и зоны вблизи них, являются потенциально дефектными в микромасштабе, уже в процессе образования отверстий, с возможной повышенной вероятностью возникновения и роста дефектов в процессе эксплуатации. Приведены известные подходы по решению этой проблемы и снижению

отрицательного влияния указанных дефектов на несущую способность конструкций. Актуальность выработки эффективных решений дополнительно подтверждается большим количеством крепежных отверстий и элементов в современных и перспективных агрегатах из композитов в том числе высокоответственных в ресурсоограничивающих зонах, высокой трудоемкостью их получения с помощью механической обработки.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе приведены объекты исследований и основные методы.

2.1 Объекты исследования

Объектами исследования были выбраны конструкционный эпоксидный углепластик ВКУ-30К.Р14535, конструкционный эпоксидный стеклопластик ВПС-32К10 широко используемые в современном авиастроении, экспериментальный эпоксидный углепластик Р14535/ЭД-20+ПЭПА.

2.1.1 Углепластик ВКУ-30К.Р14535

Композиционный материал марки ВКУ-30К.Р14535 на основе углеродного однонаправленного наполнителя фирмы Porcher арт.14535 и связующего на эпоксидной основе ВСК-14-3 [32 – 36] применяется в качестве основного конструкционного материала композитных деталей, узлов и агрегатов современных и перспективных боевых АК. Материал предназначен в том числе для изготовления за одну технологическую операцию многослойных сэндвичевых конструкций одинарной и сложной кривизны, а также средненагруженных элементов внешнего контура самолетов. Материал может эксплуатироваться в общеклиматических условиях в температурном диапазоне от минус 60 до плюс 150 °С.

В таблице 2.1 приведены характеристики углеродного наполнителя композиционного материала по ТУ 1916-003-37827480-2013, с изм. 1 «Ткань углеродная однонаправленная».

Таблица 2.1. Характеристики углеродного наполнителя композиционного материала по ТУ 1916-003-37827480-2013, с изм. 1 «Ткань углеродная однонаправленная»

Артикул	Ширина, мм	Переплетение	Кол-во нитей основа/уток; нитей/см	Основа	Уток	Распределение нитей основа/уток, %	Поверхностная плотность, г/м^2
14535	300±10	полотно	1,7/1,0	12К HS	ЕС9 34 1383	97.5/2.5	135±5

В таблице 2.2 приведены характеристики связующего по ТУ 1-595-14-1200-2011, с изм. 1 «Связующее клеевое марки ВСК-14-3» [37 - 38].

Таблица 2.2. Характеристики связующего по ТУ 1-595-14-1200-2011, с изм. 1 «Связующее клеевое марки ВСК-14-3

Показатель	Значение
Внешний вид, цвет	Пластичная масса, пленка, желтого цвета, оттенок не нормируется
Температура стеклования, °С, не менее	170
Предел прочности при сдвиге клеевых соединений дюраля Д16АТ или Д19АТ, МПа, не менее, при температуре, °С 20 150	 14,7 14,7
Массовая доля летучих веществ, % не более	3,0

В таблице 2.3 приведены характеристики полуфабриката на основе углеродного наполнителя и связующего – препрега клеевого марки КМКУ-3м.150.Р14535

Таблица 2.3. Характеристики полуфабриката на основе углеродного наполнителя и связующего – препрега клеевого марки КМКУ-3м.150.Р14535

Показатель	Значение	

	КМКУ-3м.150.Р14535.45	КМКУ-3м.150.Р14535.65
Слдержание клеевого связующего в препреге, %	39±4	63±2
Предел прочности при сдвиге клеевых соединений дюраля Д16АТ или Д19АТ, МПа, не менее, при температуре, °С 20 150	 - -	 17,7 17,7
Предел прочности при равномерном отрыве обшивки от сот из фольги АМг2Н, ячейка 2,5 мм, МПа, не менее, При температуре 20 150	 - -	 3,9 2,0
Предел прочности углепластика при раст., МПа, не менее	1400	-
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	900	-
Количество летучих при отверждении, %, не более	3	3
Жизнеспособность, мес., не менее, при 25 °С, при 5 °С	 3 12	 3 12
Режим отверждения: время не менее, ч, температура, °С	3 часа при 180 ± 5	3 часа при 180 ± 5

2.1.2 Стеклопластик ВПС-32К10

Данный стеклопластик выбран также в качестве объекта и использован в исследованиях по причине его широкого применения в конструкциях, содержащих углепластики. Применяется в элементах монолитных и сэндвичевых конструкциях из углепластика в качестве укрывного (внешнего) слоя, а также присутствует в качестве разделительного слоя между пакетами, выходящими на контакт с сотовыми сердцевинами сэндвичевых трехслойных и пятислойных конструкций. Большую роль играет в формировании барьерного слоя между углепластиком и дюралевыми сотами для предотвращения образования контактной коррозионной пары. Основные свойства приведены в таблице 2.4.

Перерабатывается по препреговой технологии, в качестве наполнителя имеет стеклоткань полотняного переплетения Т-10, связующее ВСК-14-4 [32, 37].

Таблица 2.4 – Основные механические свойства стеклопластика ВПС-32К10

Показатель	Значение
σ_1+, МПа	1500
σ_1-, МПа	900
σ_2+, МПа	75
σ_2-, МПа	210
E_1^+, ГПа	42
E_1^-, ГПа	30
μ	0,31
τ_{13}, МПа	80
$G_{12}=G_{13}$, ГПа	4
E_2^+, ГПа	11
Толщина монослоя* t, мм	0,2
Ударная вязкость a_n, кДж/м^2	210

2.1.3 Экспериментальный углепластик Р14535/ЭД-20+ПЭПА

Данный углепластик не применяется в промышленном производстве, а выступил в данной работе лишь в качестве «модельной композиции». Показатели однонаправленного углеродного наполнителя представлены в таблице 2.1. Механические свойства углепластика будут изучены и приведены далее. В качестве связующего выступает хорошо изученная система на основе смеси олигомеров ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) и отвердителя полиэтиленполиамин (ТУ 2413-357-00203447-99).

2.2 Методы исследований

В работе использованы следующие методы исследований материалов.

Основные методы исследования технологических свойств композиций и термоаналитические методы: изменение условной вязкости связующего и смачивающей способности в зависимости от содержания модифицирующей

добавки измеряли на вискозиметре ВЗ-241 в соответствии с ГОСТ 748-82 и по методике измерения краевого угла смачивания модельной стеклянной подложки и образца из полированного графита (методика ПМ 596.482). Методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при помощи модуля DSC-1 фирмы «МЕТТЛЕР ТОЛЕДО» исследовали реакционную способность и получены данные для проведения компьютерного моделирования кинетики отверждения композиций в зависимости от содержания модифицирующей добавки. Моделирование процесса отверждения и степени превращения образцов композиций проведено с помощью программы «Kinetics 3» фирмы «Netzsch». Температуры стеклования образцов исследовали методом динамомеханического анализа (ДМА) на динамическом механическом анализаторе с модулем DMA-242.

Испытания физико-механических характеристик материалов проводили с применением стандартизованных методов на испытательных машинах серий «Instron-195 10 t» и «MTS Criterion 43». Испытания стандартных однонаправленных и ортотропных образцов на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг проводили в соответствие со стандартами ГОСТ 25.601-80, ГОСТ 25.602-80 и ОСТ 190199-75 соответственно. Спроектированные конструктивно подобные образцы испытывались при помощи соответствующих приспособлений на этих же машинах.

Неразрушающий выходной контроль изготовленных образцов, а также исследования проводили стандартными и внедряемыми методами дефектоскопии: акустический импедансный дефектоскоп ДАМИ-С08 с преобразователем ПАДИ-8 (ПИ 1.2.171-81), рентгенографический метод на установке фирмы Gen.Electric, «Eresco contr.», акустическая томография при помощи акустического томографа-дефектоскопа с фазированными решетками «A1550 IntroVisor» (для корректности сравнительного метода были изготовлены рабочие стандартные (настроечные) образцы). Компьютерная томография на высокоэнергетическом рентгеновском вычислительном томографе ВТ-600ХА. Температурные измерения проводили при помощи ИК-термографии на тепловизоре «Flir ThermaCAM».

Методом профилометрии при помощи контактного профилометра «Mitutoyo SJ-410» по стандарту JIS-1994 проводилась оценка параметра шероховатости.

Для виртуальных механических испытаний твердотельных моделей конструктивно подобных образцов с учетом схем армирования и упруго-прочностных констант материалов был применено конечно-элементное моделирование в среде MSC/Nastran.

Метрологическое обеспечение приведенных методов исследований и измерений обеспечивается своевременными метрологическими поверками и экспертизами и аттестацией рабочих мест.

ГЛАВА 3. ЦЕЛЕВОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ И УГЛЕПЛАСТИКА НА ИХ ОСНОВЕ – КАК МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

Материаловедческий подход к управлению физико-механическими свойствами полимерных матриц требует оценки влияния модифицирующих добавок на технологические и основные эксплуатационные свойства композиций [34]. Технологические свойства впрямую влияют на выбор и назначение основных и второстепенных параметров технологического процесса, обеспечивают достижение оптимальных технико-экономических показателей технологического процесса. Влияние на основные эксплуатационные свойства определяет возможность обеспечения заданных характеристик материала в изделии на стадии эксплуатации. Предварительно были проведены работы (вискозиметрия, термоаналитические методы) по исследованию и сопоставлению важнейших технологических свойств исходной эпоксидной композиции и модифицированной технологической добавкой. Создана кинетическая модель процесса отверждения, проведено опытное изготовление образцов из наполненных углеродным длинноволокнистым наполнителем пластиков (пропитка под давлением, автоклавное формование), проведен их неразрушающий контроль, проведены испытания стандартных образцов для получения механических свойств. Методом ИК-термографии, совмещенным с функцией записи через заданные промежутки времени, проведены измерения тепловых эффектов процессов механической обработки различным инструментом, установлена зависимость от концентрации модификатора. Исследовано качество получаемых поверхностей в отверстиях (по критерию шероховатости и разброса показателя), компьютерным томографическим методом дана относительная оценка стабильности материала («структурной плотности» - как величины, размах которой характеризует дефекты разных уровней).

Исследовано влияние введения целевого модификатора стеарата цинка в эпоксидную матрицу и углепластик на ее основе на основные технологические и эксплуатационные свойства. Модифицирование матрицы и полимерного композиционного материала на ее основе осуществлено с целью снижения повреждаемости при образовании отверстий в деталях методами механической обработки. Выявлена зависимость температурных эффектов процессов механической обработки от степени модифицирования и типов обрабатывающего инструмента.

Модифицирование матриц и пластиков на их основе, как материаловедческий подход к управлению конкретными свойствами термореактивных отвержденных пластиков, требует также оценки его влияния на технологические свойства, впрямую влияющие на выбор и назначение основных и второстепенных параметров технологического процесса, обеспечивающих достижение оптимальных технико-экономических показателей технологического процесса и возможность обеспечения заданного уровня качества изготовления деталей из ПКМ. В качестве «модельного» связующего для снятия технологических и эксплуатационных характеристик (только тех, которые имеют высокую важность в пределах обозначенной цели) использовалась эпоксидиановая смола ЭД-20 в системе с отвердителем ПЭПА.

3.1 Оценка целевого модифицирования с точки зрения влияния на технологические свойства композиций

Важнейшими свойствами связующего и армирующих наполнителей в ПКМ является их совместимость – способность связующего смачивать поверхность наполнителя и обеспечивать высокую адгезионную прочность сцепления наполнителя с матрицей [40]. Смачивающую способность связующих оценивали

по значениям краевых углов смачивания [41 - 42], определяемых по параметрам малых капель, нанесенных на модельную стеклянную подложку и полированную графитовую пластину (методика ПМ 596.482). Метод основан на определении геометрических размеров капли и требует только линейных измерений на снимках.

Для оценки влияния стеарата цинка как антиадгезионной добавки на смачивающую способность связующего были определены углы смачивания композицией, содержащей различное количество стеарата цинка (0; 0,5; 5,0 %), модельной стеклянной подложки и пластины из полированного графита.

Результаты измерений краевого угла смачивания трех композиций для оценки смачивающей способности приведены в таблице 3.1.

Измерения проводились при 20 ºС для образцов композиции с одинаковой термической историей и из компонентов из одинаковых партий. После совмещения компонентов на образцы смесей накладывалось УЗ воздействие в ванне мощностью 50 Вт в течение 15 минут для улучшения условий диспергирования модификатора.

Общий вид капли связующего при измерении методом определения геометрических размеров капли представлен на рисунке 3.1.

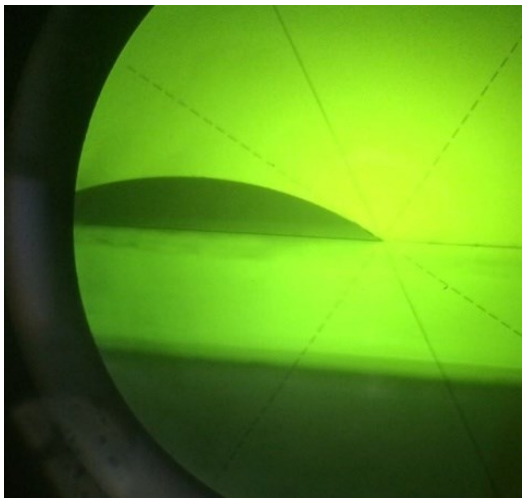


Рисунок 3.1 – Общий вид метода измерения краевого угла смачивания

Таблица 3.1 - Результаты измерений краевого угла смачивания [42]

Серия измерений	Образцы композиции	Концентрация модификатора, %	Краевой угол смачивания
1	1с	0	15º40´
2	3с	0,5	15º40´
3	5с	5,0	15º00´

Из результатов видно, что степень модифицирования стеаратом цинка практически не влияет на смачивающую способность и находится в пределах, близким к пределам погрешности измерений.

Оценивалась условная вязкость модифицированных связующих по вискозиметру ВЗ-241 в соответствии с ГОСТ 748-82 с диаметром фильеры 4 мм. На навески связующего непосредственно после модифицирования накладывалось УЗ-воздействие в ванне мощностью 50 Вт в течение 15 минут для улучшения условий диспергирования модификатора стеарата цинка. Среднее значение по трем испытаниям каждого варианта связующего приведено в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Результаты измерения условной вязкости немодифицированного и модифицированных связующих

Серия измерений	**Образец связующего**	**Степень модифицирования, %**	**Среднее значение усл.вязкости, с**
1	1в	0	50,5
2	2в	0,1	41,5
3	3в	0,5	48,17
4	4в	1,0	52,17
5	5в	5,0	121,33

На рисунке 3.2 представлена зависимость условной вязкости связующего от степени модифицирования [42 - 45]. Измерения проводились при температуре переработки (Т = 60 °С). При нормальной температуре вязкость смолы марки ЭД-20 не подлежит измерению данным методом. Проводилось по три измерения для каждой концентрации.

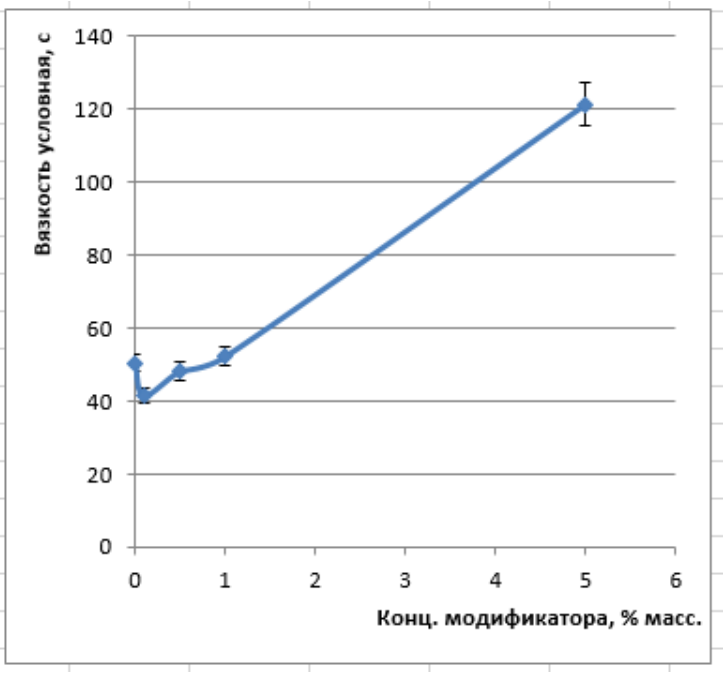


Рисунок 3.2 - Зависимость условной вязкости связующего от степени модифицирования

3.2 Оценка влияния на кинетику отверждения и корректировка параметров технологического процесса пропитки и отверждения

Особый интерес представляло исследование вклада СЦ в процесс отверждения связующего. Во-первых, СЦ, как поверхностно-активное вещество может повлиять на показатель температуры стеклования отвержденного связующего и пластика на его основе, что при прочих равных условиях может повлиять на теплостойкость композита. Во-вторых, конечной целью кинетических

расчетов при исследовании процессов отверждения является прогнозирование изменения степени завершенности реакции (степени превращения) от температуры, времени и скорости нагрева [47 - 48]. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) позволяет проводить такие исследования практически независимо от вида и содержания модификаторов и наполнителей [48]. По кривым ДСК реакции отверждения полимерного материала можно определить температуру начала и конца процесса, температуру максимальной скорости реакции, тепловой эффект реакции и другие параметры. Эти данные дают возможность сравнительно быстро подобрать оптимальную температуру отверждения. Важными параметрами являются также кинетические характеристики и время отверждения при заданной температуре до заданной степени конверсии [48 - 54]. Знание температур фазовых переходов имеет большое прикладное значение, в том числе и при модифицировании связующих и полимерных композитов на их основе – это позволяет определить оптимальные режимы переработки и отверждения [55 - 60]. Моделирование процесса отверждения и определение степени превращения образцов композиций (связующих) осуществляли с помощью компьютерной программы Kinetics 3 фирмы «Netzsch» [59 - 60]. Программа позволяет, используя итерационный метод, выбрать из предлагаемого программой набора наиболее подходящий тип реакции и, применив основное кинетическое уравнение Аррениуса $k = k_0 e^{-E/RT}$, рассчитать значения кинетических параметров, необходимых для построения кинетической модели реакции. Построенная модель, сохраненная в отдельном файле данных соответствующего формата, используется в дальнейшем программой Kinetics 3 в режиме «Прогнозирование» для определения степени превращения связующего в каждый момент заданного температурно-временного цикла [10].

Степень превращения связующего по конечному продукту реакции определяли в автоматическом режиме при выполнении программы расчета по кривым ДСК неотвержденных образцов как изменение площадей пиков

тепловыделения в зависимости от текущего изменения температуры и скорости нагрева.

В таблице 3.3 представлены результаты исследования методом ДСК композиций на основе связующего с различными степенями модифицирования СЦ.

Таблица 3.3 - Результаты ДСК исходных композиций и композиций, отвержденных при Т=24 °С в течение 22 суток.

Показатели свойств	Значения показателей*									
	Исходные характеристики					После отверждения при Т= 24°С				
Номера композиций	1в	2в	3в	4в	5в	1в	2в	3в	4в	5в
Концентрация стеарата Zn, % масс.	0	0,1	0,5	1,0	5,0	0	0,1	0,5	1,0	5,0
Температура стеклования, °С	-19,3	-16,7	-19,8	-18,9	-18,7	50,4	43,4	44,8	44,4	43,7
Удельная теплота релаксации, Дж/г	-0,12	-0,26	-0,62	-0,74	-1,03	-4,86	-5,48	-5,59	-5,64	-2,75
Пик релаксации, °С	-13,4	-10,8	-13,7	-12,7	-13,0	55,9	49,9	50,9	50,4	50,7
Тепловой эффект отверждения, Дж/г	308	219	243	228	186	16,8	17,5	21,4	27,6	25,4
Начало активного отверждения, °С	66,4	62,9	67,7	68,3	49,4	92,0	80,3	83,1	76,9	117
Пик реакции отверждения, °С	103	103	104	105	122	116	107	109	107	141

* Скорость нагрева 10 С/мин

Для исследования термоаналитическими методами отвержденных композиций с различным содержанием модификатора были изготовлены матричные образцы. После совмещения олигомера ЭД-20 с заданными количествами стеарата цинка (перечень композиций приведен в таблице) на композицию накладывалось УЗ-излучение в УЗ-ванне для улучшения условий диспергирования модификатора в композиции. В качестве формообразующей была применена металлическая сборная форма-оснастка, специально изготовленная для образцов габаритами (120±0,5) х (80±0,5) х (4±0,5) мм.

После совмещения компонентов композиции с заданным количеством отвердителя ПЭПА (10 % масс.) композиция заливалась в форму-оснастку и

помещалась в термошкаф для отверждения по одинаковому для всех композиций типовому «горячему» режиму: 1 час при 60 °С.

Общий вид отвержденных заливочных образцов представлен на рисунке 3.3.

Рисунок 3.3 – Общий вид отвержденных матричных образцов, изготовленных методом заливки без давления

В таблице 3.4 приведены результаты измерений методом ДМА на приборе фирмы «Netzsch» DMA-242 температуры стеклования на заливочных образцах композиций с различным содержанием модификатора (рисунок 3,4).

Из данных образцов вырезались образцы для испытаний по схеме одноплечевого изгиба (консольная балка). Метод определения точки температуры стеклования – точка пересечения кривой эффективного модуля и кривой модуля потерь E` и E`` соответственно.

Таблица 3.4. Результаты ДМА-измерений температуры стеклования на заливочных образцах композиций с различным содержанием модификатора

Концентрация модификатора, масс. %	№ обр. (по изгот.)	№ обр.	Т ст., °С	«Перегиб» на зависимости Е, °С	Δ (E``-E`), °С
0	17	1м	53,6	58	4.4
0,1	2	2м	54	58,3	4.3
0,2	3	3м	45	50,6	5.6
0,3	5	4м	49	46,2	-2.8
0,5	7	5м	50,5	54,1	3.6
1,0	9	6м	51	55,4	4.4

2,0	11	7м	57,8	63,8	6
3,0	13	8м	-	-	-
5,0	16	9м	66	78,6	12.6

* Скорость нагрева 2 С/мин

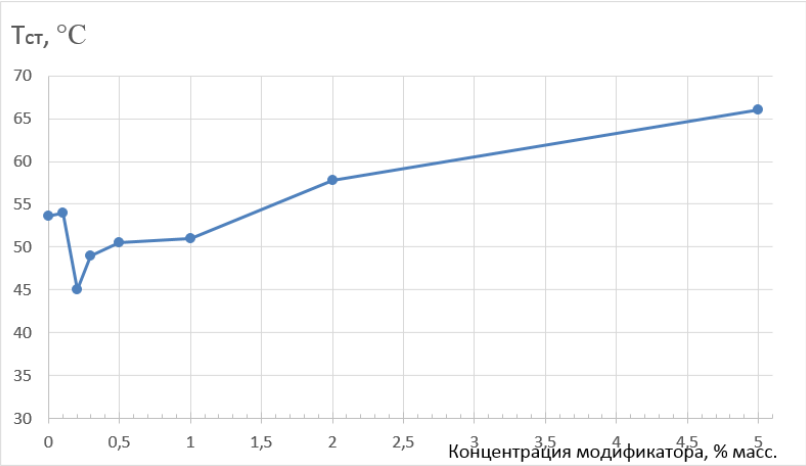


Рисунок 3.4 – Зависимость температуры стеклования образцов матриц, отвержденных по «горячему режиму» при измерении методом ДМА от концентрации стеарата цинка в композициях.

Анализируя полученные данные можно сделать вывод о незначительном снижении температуры стеклования композиции при ее «холодном отверждении» с повышением концентрации СЦ. По все видимости это связано с некоторым несущественным снижением степени отверждения при увеличении концентрации СЦ. Вместе с тем, при отверждении всех матричных образцов по типовому «горячему методу», наблюдается падение температуры начала стеклования в интервале 0,1 … 0,2 % с последующим его повышением начиная со значения 0,3 % и монотонное его повышение до температур около 65 °С при 5,0 % масс. Изменение значений температур начала стеклования в образцах с различным содержанием СЦ, но отвержденных по единому типовому режиму, обусловливает необходимость корректировки температурно-временных режимов отверждения для достижения предельных степеней конверсии (глубин отверждения).

Моделирование процесса отверждения и определение степени превращения образцов композиций (связующих) осуществляли с помощью компьютерной программы Kinetics 3 фирмы «Netzsch» [60 - 62]. Программа позволяет, используя итерационный метод, выбрать из предлагаемого программой набора наиболее

подходящий тип реакции и, применив основное кинетическое уравнение Аррениуса $k = k_0 e^{-E/RT}$, рассчитать значения кинетических параметров, необходимых для построения кинетической модели реакции. Построенная модель, сохраненная в отдельном файле данных соответствующего формата, используется в дальнейшем программой Kinetics 3 в режиме «Прогнозирование» для определения степени превращения связующего в каждый момент заданного температурно-временного цикла.

Оценку кинетических параметров реакции отверждения композиций проводили стандартными термоаналитическими методами: на дифференциальном сканирующем калориметре DSC-1 швейцарской фирмы «МЕТТЛЕР ТОЛЕДО» в неизотермических условиях при нагревании со скоростями: 5, 10 и 20 °/мин.

Установлены кинетические параметры реакции отверждения связующих с разной степенью модифицирования (рисунки 3.5 – 3.6).

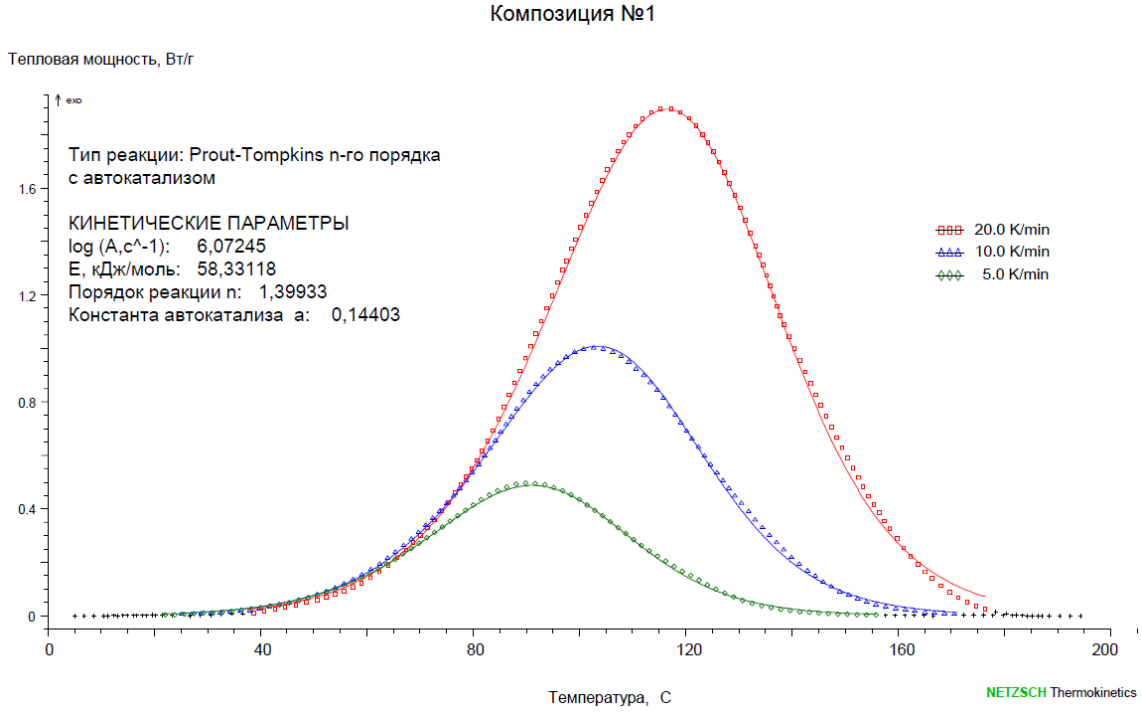


Рисунок 3.5 – Кривые ДСК, смоделированные с использование рассчитанных кинетических параметров (сплошная линия), и их экспериментальные значения (точки) для композиции модельного связующего ЭД-20+ПЭПА (0 % модифицирования)

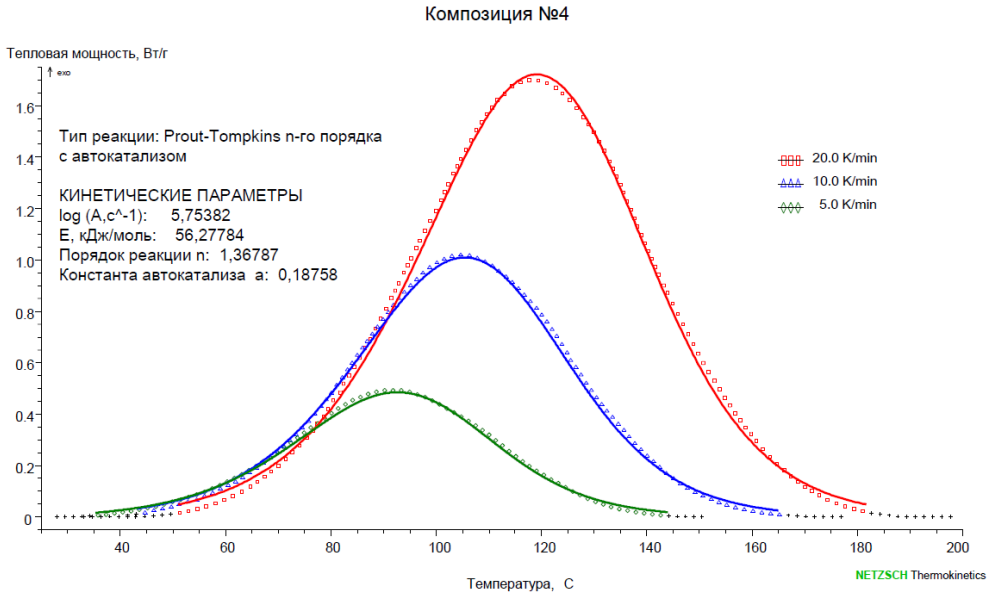


Рисунок 3.6 – Кривые ДСК, смоделированные с использованием рассчитанных кинетических параметров (сплошная линия), и их экспериментальные значения (точки) для композиции модельного связующего ЭД-20+ПЭПА (1,0 % модифицирования).

Выявлено, что добавка является химически инертной и качественно не влияет на прохождение химической реакции отверждения. Созданная кинетическая модель, полученная после серии измерений теплового эффекта при разных скоростях нагрева (5,0; 10,0; 20,0 ºС/мин.) позволяет назначать оптимальные температурно-временные параметры технологического процесса переработки с учетом прогнозирования полноты отверждения.

На рисунках 3.7 – 3.8 представлены температурно-временные зависимости для немодифицированного варианта связующего и модифицированного 1-% масс. СЦ для заданных степеней отверждения, которые прогнозирует соответствующая кинетическая модель.

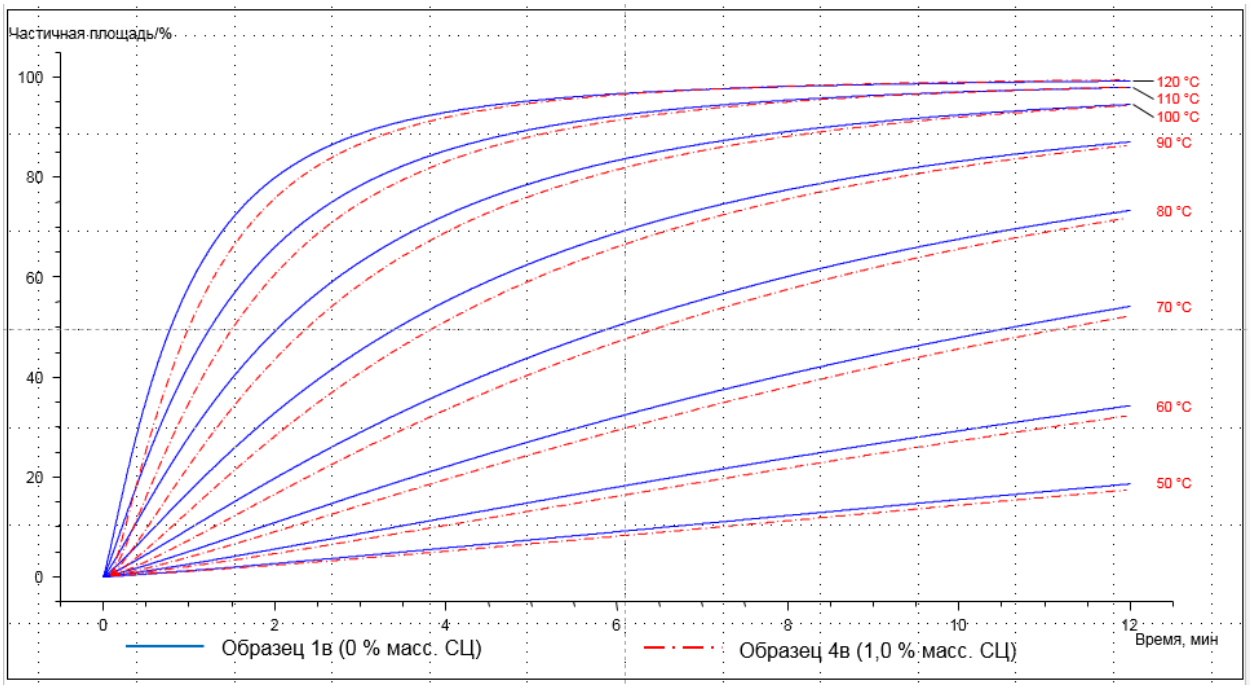


Рисунок 3.7 – Графическое представление кинетических моделей реакции отверждения немодифицированного (1в) и модифицированного 1-% масс. СЦ (4в) связующих

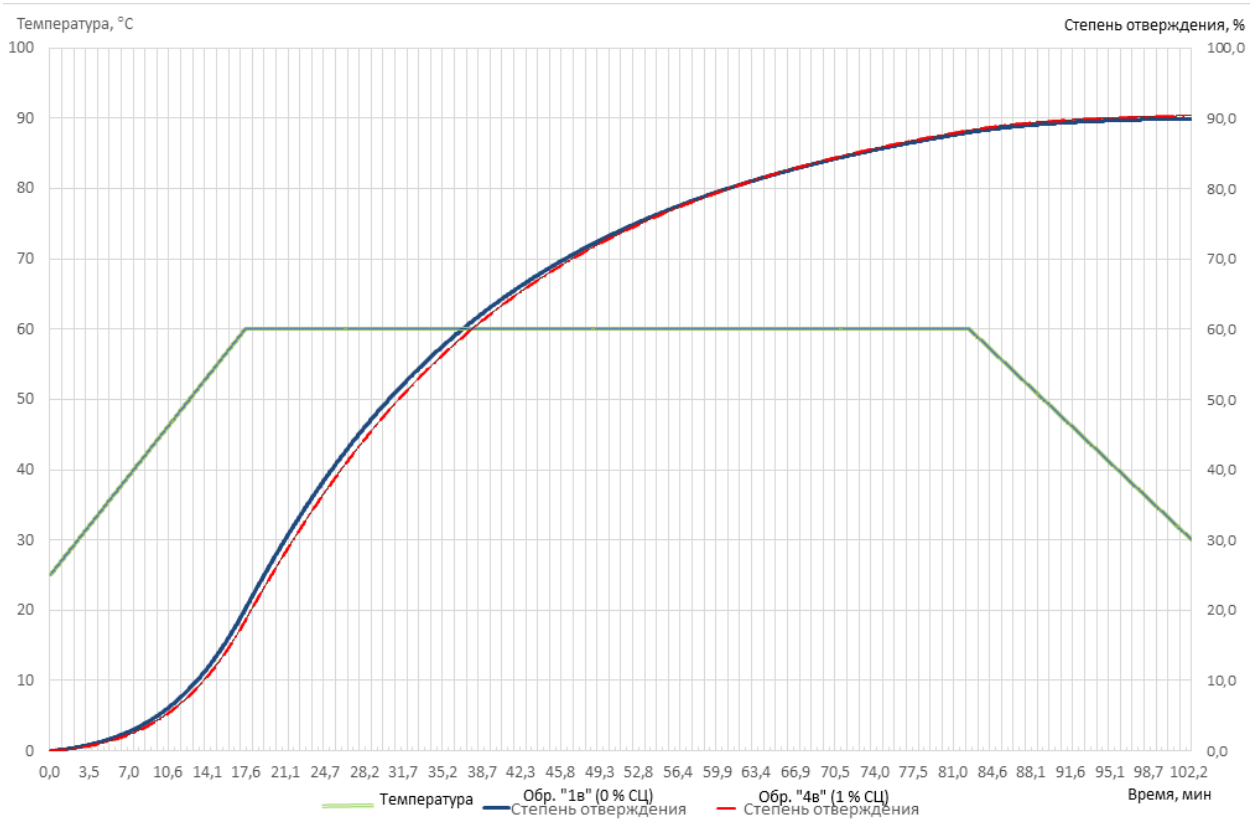


Рисунок 3.8 – Графическое представление прогнозируемых изменений степени превращения немодифицированной («1в») и модифицированной («4в») в условиях, заданных параметрами базовых режимов отверждения

Исходя из анализа представленных кинетических моделей выявлено незначительное влияние модифицирования целевым модификатором на кинетику реакции отверждения связующего. Например, найдено, что с ростом содержания СЦ от 0 % до 1 % масс. прогнозируемое время отверждения при типовом режиме отверждения (60 °С) до одинаковой степени отверждения ~0,50 увеличивается на 2 - 3 минуты. При степенях отверждения, близких к ~0,9, «отставание» модифицированной композиции уменьшается при типовом режиме отверждения. Таким образом, в рассмотренном случае СЦ является слабоингибирующей добавкой, незначительно замедляющей ход реакции отверждения, но при проектировании технологического процесса переработки модифицированных данной добавкой материалов необходимо корректировать технологические параметры, что с заданной степенью точности позволяет созданная модель. При концентрациях, больших 2 – 3 % масс. выявлено более активное влияние модификации на кинетику отверждения.

3.3 Изготовление экспериментальных углепластиковых образцов

Было опробовано совмещение модифицированных связующих с сухим наполнителем и формование экспериментальных панелей с учетом корректировок режимов по времени. Был реализован жидкофазный метод совмещения под давлением – пропитка под давлением с последующим автоклавным формованием.

При совмещении связующих с пакетом сухих наполнителей разница в условных вязкостях не была заметна и не создавала проблем технологического плана. Например, композиции с относительно пониженной вязкостью («2в», «3в») не требовали специальных мер по их удержанию в пределах пакета-заготовки перед пропиткой. Так же как и композиция с повышенным уровнем условной вязкости («5в») успешно в пределах времени переработки $\tau_{\text{перераб.}}$ была распределена по поверхности оснастки перед совмещением.

На подготовленную соответствующим образом формообразующую оснастку (плоскую плиту) наносился слой связующего в количестве, соответствующем 45 % масс. от теоретического состава композита. Собранные в соответствии со схемами армирования пакеты-заготовки из сухого наполнителя выкладывались на слой связующего на оснастке. Был собран типовой технологический пакет с применением в том числе дренажных слоев, обеспечивающих равномерную откачку воздуха и отвод излишков связующего, и проведена вакуумная пропитка с последующим автоклавным формованием по режиму:

Скорость нагрева по отстающей термопаре – не более 2 °/мин – до $T_{пропитки} = T_{формования} - 60$ °С;

Разрежение $P_{вак.} = P_{пропитки}$ – не менее 0,85 атм (разряжение под вакуумным чехлом в течение всего периода пропитки – формования);

Давление $P_{раб.тела}$ = 5,5…6,0 атм (давление подается при достижении температуры 60 °С по отстающей термопаре, установленной в технологический пакет);

Охлаждение до температуры не менее 30 °С со скоростью не более 2 °/мин.

$\tau_{пропитки\ при\ нагреве} = (21 \pm 5)$ мин. при скорости подъема температуры не более 2 °/мин.

$\tau_{выдержки} = (60+5)$ мин. – соответствует режиму отверждения смолы холодного отверждения типа ЭД-20;

$\tau_{охлаждения} = (21 \pm 5)$ мин. при скорости снижения температуры не более 2 °/мин.

Итого время переработки и формования $\tau = \tau_{пропитки\ при\ нагреве} + \tau_{выдержки} + \tau_{охлаждения} = (102 \pm 15)$ мин.

Основные параметры технологического процесса пропитки и формования панелей (рисунок 3.9) записаны средствами объективного контроля.

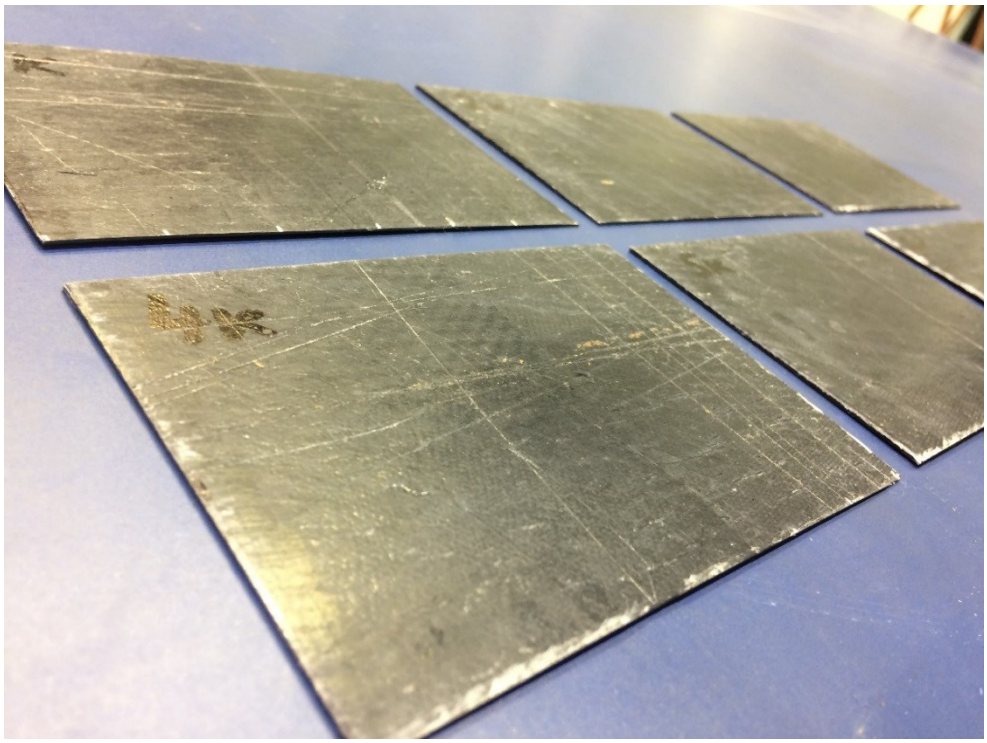


Рисунок 3.9 – Общий вид отформованных образцов

Полученный диапазон вязкостей (условных вязкостей по таблице 3.2) является допустимым и достаточным для пропитки сухого наполнителя типа углеродных лент для опробованных толщин, количеств монослоев и схем укладок, что подтвердили визуальный контроль образцов после пропитки и формования и исследование акустическими неразрушающими методами. Опытные монолитные панели с габаритами 300 х 300 мм собраны из 10 слоев сухого наполнителя с теоретической толщиной монослоя 0,14 мм, укладка 0°, средняя толщина образца составила 1,5 мм. Монолитные панели из 10 слоев с укладкой 0°/90° с габаритами 120 х 120 мм – также подтверждена качественная пропитка всеми вариантами связующих и отсутствие дефектов, выявляемых акустическими неразрушающими методами. Дефектоскопия была проведена акустическим импедансным методом с помощью дефектоскопа ДАМИ-С08 с преобразователем типа ПАДИ-8 в соответствии с ПИ 1.2.171-81.

3.4 Оценка влияния на основные механические свойства

Для оценки влияния модифицирования матриц и пластиков на их основе на основные механические свойства были изготовлены и испытаны стандартные образцы: на растяжение, на сжатие, на межслоевой сдвиг. Панели после изготовления перед раскроем на образцы прошли неразрушающий контроль акустическим методом с помощью импедансного дефектоскопа ДАМИ-С08 с преобразователем типа ПАДИ-8 в соответствии с ПИ 1.2.171-81.

Общий вид стандартных однонаправленных образцов для испытаний на растяжение представлен на рисунке 3.10.

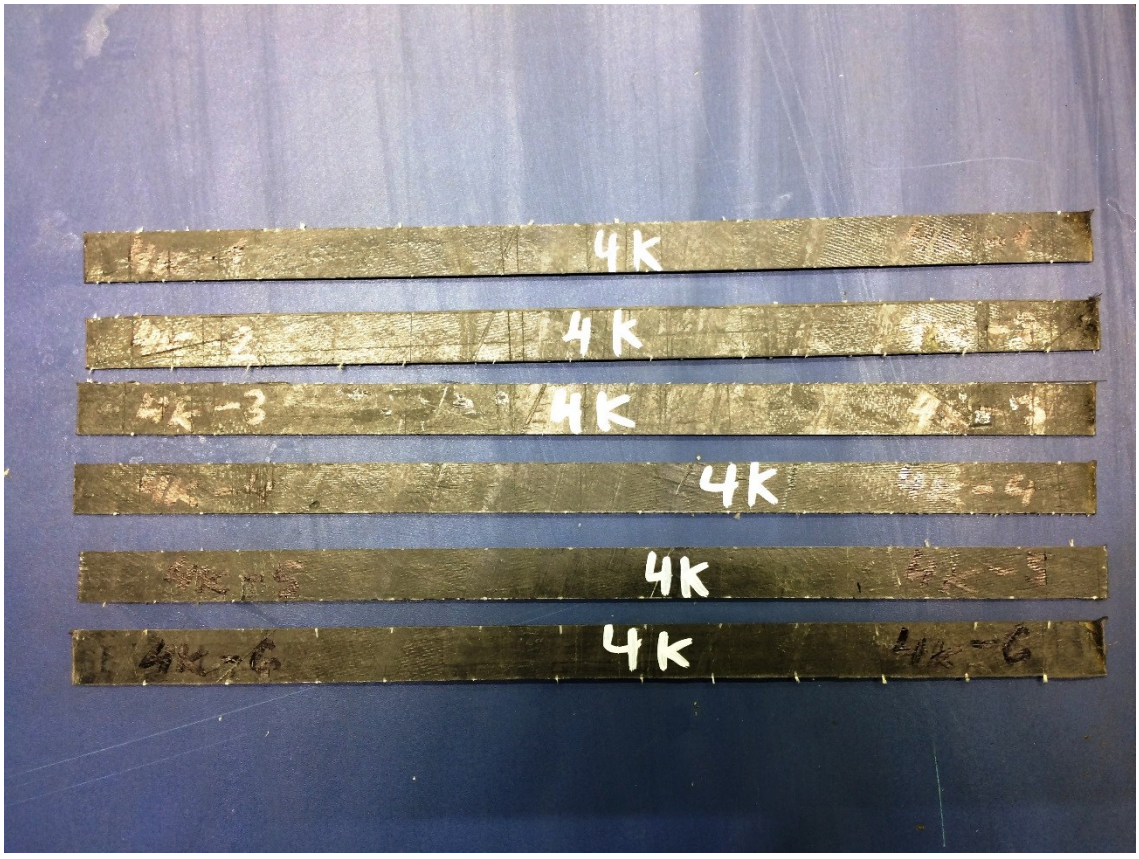


Рисунок 3.10 – Общий вид стандартных однонаправленных образцов для испытаний на растяжение

Общий вид стандартных однонаправленных образцов для испытаний на сжатие представлен на рисунке 3.11.

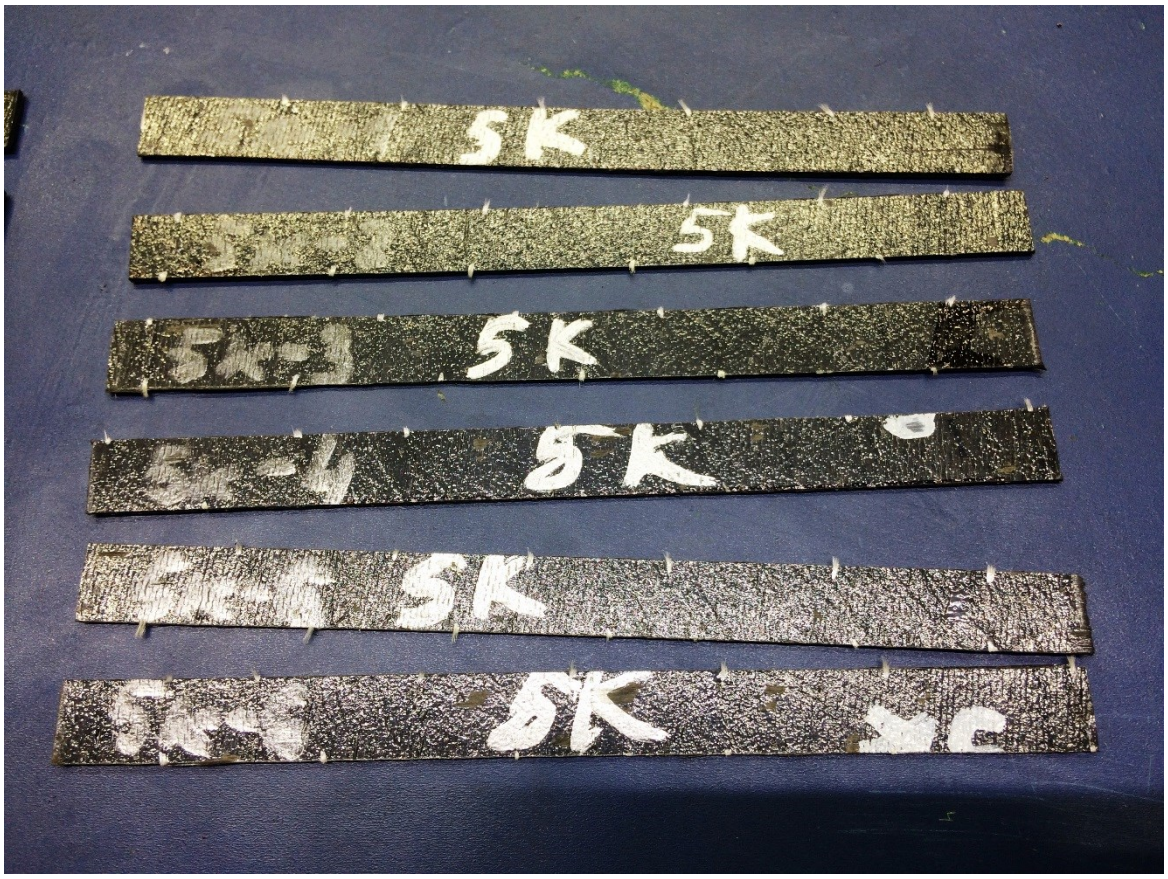


Рисунок 3.11 – Общий вид стандартных однонаправленных образцов для испытаний на сжатие

Общий вид стандартных квазиизотропных образцов для испытаний на межслоевой сдвиг представлен на рисунке 3.12.

Рисунок 3.12 – Общий вид стандартных квазиизотропных образцов для испытаний на межслоевой сдвиг

Испытания проводились при температуре 20 градусов, количество образцов для каждого исполнения – не менее 6. Результаты приводятся в таблице 3.5 (рисунок 3.13 – 3.14).

Таблица 3.5. Результаты механических статических испытаний пластиков с разной степенью модифицирования

Концентрация модификатора, % масс.	Прочность при растяжении σ_1^+, МПа	Прочность при сжатии σ_1^-, МПа	Прочность при межслоевом сдвиге τ_{13}, МПа
	ГОСТ 25.601-80	ГОСТ 25.602.80	ОСТ 190199-75
	мин.-макс.	мин.-макс.	мин.-макс.
	ср.знач.	ср.знач.	ср.знач.
0	780-1224	330-401	23,7-27,5
	959	375	25,7
0,1	1042-1120	453-627	-
	1081	554	
0,3	889-1356	353-471	27,1-31,8
	1043	428	29,3

0,5	1110-1412	375-476	-
	1326	414	
1,0	1014-1351	374-525	30,6-33,1
	1174	460	31,6
5,0	928-1376	347-430	17,9-22,3
	1196	376	20,4

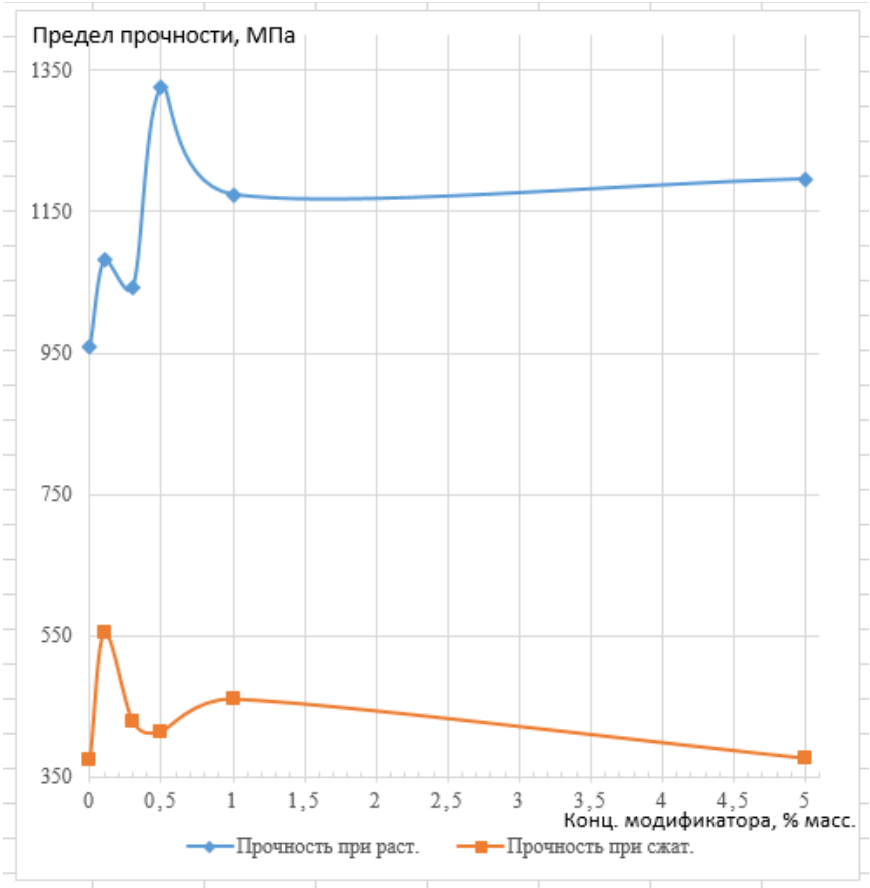


Рисунок 3.13 – Графическая зависимость средних значений прочности образцов из углепластика при растяжении и при сжатии от концентрации модификатора

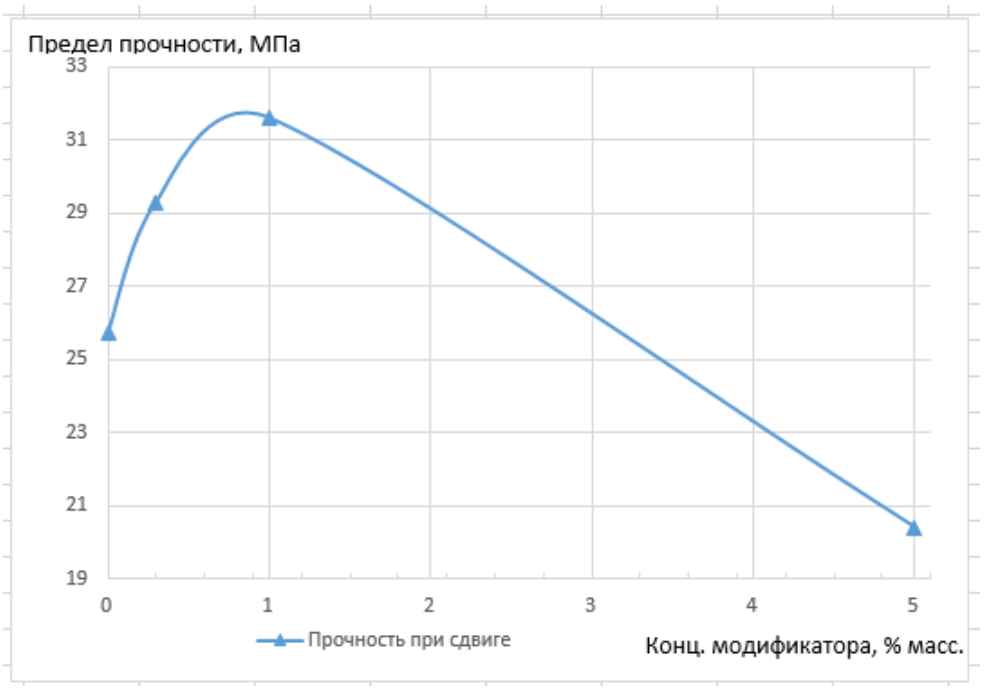


Рисунок 3.14 – Графическая зависимость средних значений прочности образцов из углепластика при межслоевом сдвиге от концентрации модификатора

Показано, что модифицирование эпоксидной матрицы и конструкционного углепластика на ее основе, полученного методом пропитки под давлением с последующим вакуум-автоклавным формованием в диапазоне концентраций 0…5,0 % не снижает прочностных показателей для нагружений типа растяжение и сжатие. Наблюдается снижение прочности при межслоевом сдвиге при концентрациях, приближающимся к 5 % со значений 3 %. Для нагружений типа растяжение и сжатие наблюдаются максимумы показателей при 0,5 и 0,1-0,3 % соответственно.

3.5 Исследование влияния модифицирования на температуры в зоне резания при образовании отверстий методами механической обработки

Для сравнительного анализа тепловых эффектов при механической обработке для образования отверстий был использован метод теплового

неразрушающего контроля в режиме реального времени механической обработки образцов.

На механическую обработку образцов в виде пластин с номинальными габаритами из матричных образцов, полученных методом заливки без давления, и отформованных образцов из углепластика, была написана управляющая программа обрабатывающего центра с числовым программным управлением (ЧПУ) для образования сквозных отверстий с заданными режимами резания (скорость N = 1000 об/мин, подача S = 30 мм/мин). Режим резания был назначен в соответствии с рекомендациями руководящих технических материалов по механической обработке монолитных эпоксидных углепластиков и являлся постоянной величиной. Образование отверстий производилось тремя типами специализированного инструмента: сверло из быстрорежущей стали, фреза торцевая трубчатого типа с алмазным среднезернистым напылением, фреза торцевая из быстрорежущей стали шпоночная трехзаходная. Воздушное принудительное охлаждение и подача смазывающих охлаждающих жидкостей были отключены. Механическая обработка производилась с открытыми дверями центра при обеспечении выполнения требований техники безопасности.

Реализация температурных измерений при механической обработки материалов представляет собой сложную инженерную задачу, что обусловлено рядом причин. Основными из них являются малые размеры площадок, на которых протекают тепловые процессы, неравномерное распределение температуры по глубине и вдоль поверхностей контактирующих тел, весьма краткий период существования и случайный во времени и пространстве характер появления единичных тепловых источников [63 - 65]. В данном исследовании применен прямой метод бесконтактного измерения температуры ИК-термография [63]. Для снятия тепловых эффектов при механической обработке использован инфракрасный тепловизор с функцией записи модели Flir ThermaCAM. Тепловизор был установлен напротив раскрытых дверц обрабатывающего центра по осевой

линии механической обработки на стационарном штативе на удалении (1000 ± 50) мм от зоны механической обработки.

Линия визирования «видоискатель – объектив – накерненная метка на образце» была расположена под углом (30 ± 5) ° (схема на рисунке 3.15). Метки на образцах были нанесены предварительно в соответствии с управляющей программой на глубину 0,5 мм. Необходимо отметить, что перекрестье в видоискателе было статично наведено на данную метку. Следовательно, измерялась обощенная интегральная величина, так как в первый момент это была температура образца, в момент начала соприкосновения инструмента и заготовки – это была температура вблизи режущей зоны инструмента, а по мере заглубления инструмента в заготовку – это была температура инструмента (видимой его части). В образцах (рисунок 3.16) каждый ряд отверстий выполнялся последовательно с выдержкой на воздухе инструмента и заготовке и их очистке. Пример моментного снимка тепловой картины приведен на рисунке 3.17. После сверления первого отверстия в ряду инструмент не выдерживался до начальной температуры. До момента пуска сверления запускалась запись тепловой картины с частотой съемки 1 $с^{-1}$.

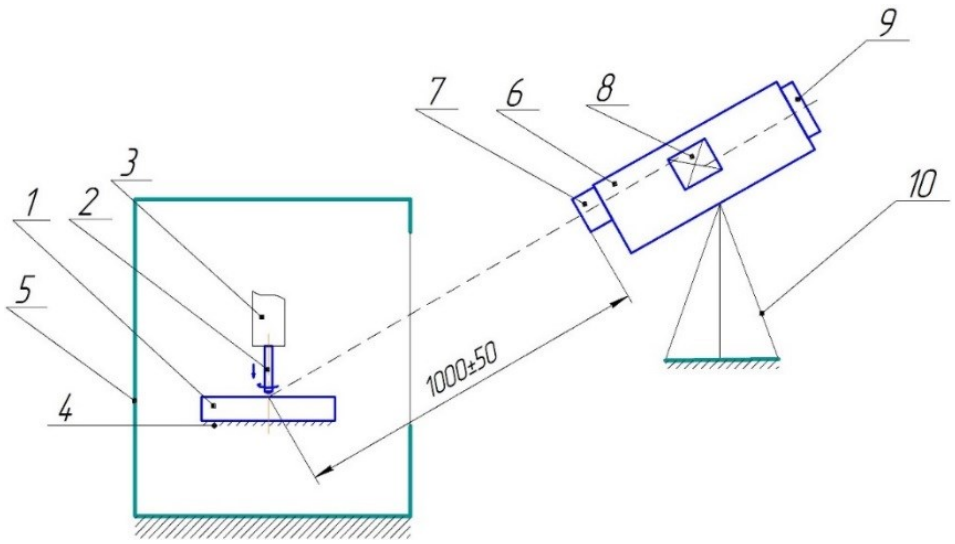


Рисунок 3.15 – Схема взаимного расположения обрабатывающего центра – образца – тепловизора

1 – образец; 2 – рабочий режущий инструмент; 3 – зажимной патрон; 4 – рабочий стол центра; 5 - обрабатывающий центр с ЧПУ; 6 – тепловизор; 7 – объектив; 8 – оптико-цифровой преобразователь; 9 – видоискатель; 10 – опора

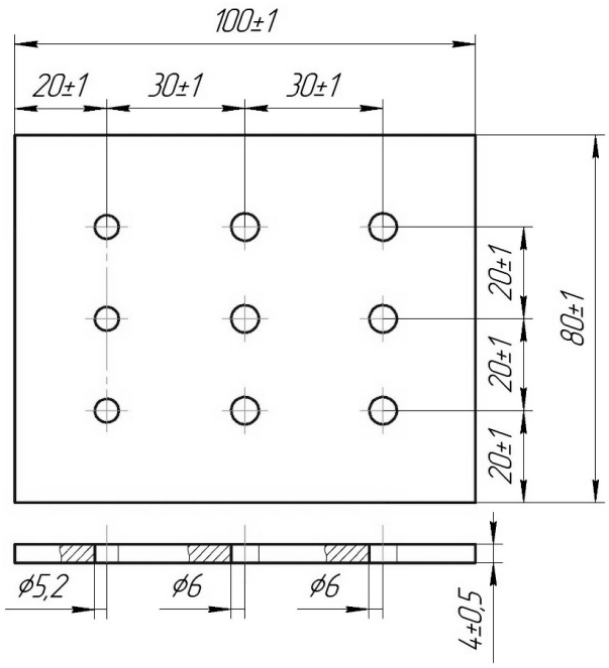


Рисунок 3.16 – Эскиз матричного заливочного образца

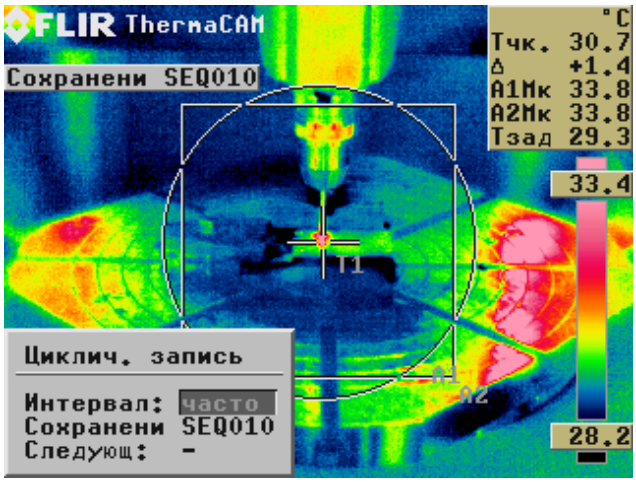


Рисунок 3.17 – Пример моментного снимка тепловой картины процесса образования отверстия методом механической обработки

$T_{зад}$ – значение начальной температуры; $T_{чк}$ – моментное значение температуры в зоне мех.обработки (под перекрестьем); Δ - разница значений $T_{чк}$ и $T_{зад}$

На рисунках 3.18 и 3.19 изображены фрагменты испытанных образцов: матричных и углепластиков соответственно.

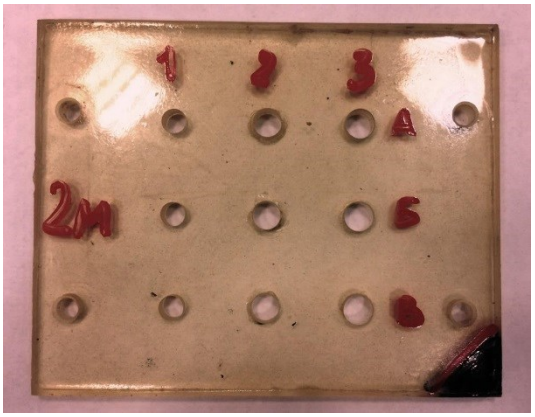


Рисунок 3.18 – Пример матричного образца после образования отверстий методами механической обработки

1 – Сверло из быстрорежущей стали, Ø 5.2 мм; 2 – Фреза трехзаходная, Ø 6.0 мм; 3 – Фреза торцевая трубчатая с алмазным напылением, Ø 6.0 мм; А, Б, В – три последовательных прохода без промежуточного охлаждения

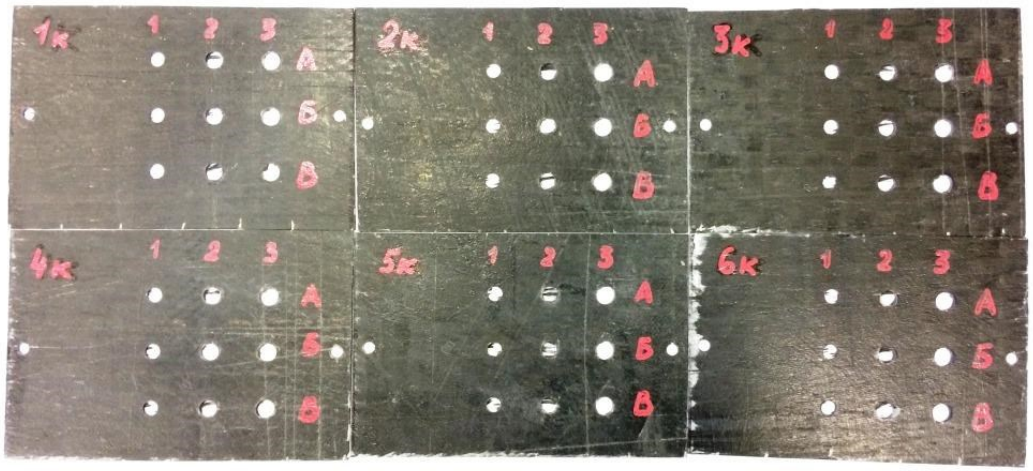


Рисунок 3.19 – Серия композитных образцов на основе модифицированных матриц после образования отверстий методами механической обработки

1 – Сверло из быстрорежущей стали, Ø 5,2 мм; 2 – Фреза трехзаходная, Ø 6.0 мм; 3 – Фреза торцевая трубчатая с алмазным напылением, Ø 6.0 мм; А, Б, В – три последовательных прохода без промежуточного охлаждения; 1к…6к – номера образцов

В таблицах 3.6 – 3.7 представлены усредненные показатели температурных максимумов в зависимости от вида инструмента и степени модифицирования эпоксидной матрицы. Образцы, значения по которым представлены в таблице 3.6, изготовлены методом заливки без давления. Образцы углепластиков (таблица 3.7) изготовлены методом пропитки под давлением и формования с использованием вакуум-автоклавного способа.

Таблица 3.6. Усредненные показатели температурных максимумов в зоне сверления в зависимости от вида инструмента и степени модифицирования эпоксидной матрицы

	Инструмент		
Концентрация модификатора, % масс.	Сверло, Ø 5,2 мм	Фреза трехзаходная, Ø 6,0 мм	Фреза торцевая трубчатая с алмазным напылением, Ø 6,0 мм
	Ср. значение температуры*, ° С		
	Тмакс	Тмакс	Тмакс
0	52	85	95
0.1	40	83	56
0.2	37	50	60
0.3	38,8	55	65
0.5	45,3	70	80
1.0	51	75	90,6
2.0	56,5	80	90,5
3.0	57	80	92
5.0	59,6	85	84

* Примечание: среднее значение температур при трех последовательных измерениях. $T_{зад}$ = 28-30 ° С.

Таблица 3.7. Усредненные показатели температурных максимумов в зоне сверления в зависимости от вида инструмента и степени модифицирования матрицы эпоксидного углепластика

		Инструмент		
Вариант образца	Концентрация модификатора, % масс.	Сверло, Ø 5,2 мм	Фреза трехзаходная, Ø 6,0 мм	Фреза торцевая трубчатая с алмазным напылением, Ø 6,0 мм
		Ср. значение температуры*, ° С		
		$T_{макс}$	$T_{макс}$	$T_{макс}$
1к	0	41,7	55,6	69,8
2к	0,1	30,5	56,6	51,6
3к	0,3	33,3	46,5	44,5
4к	0,5	32,5	36,1	46,3
5к	1,0	37,5	51,5	66,4
6к	5,0	53,3	54,3	71,2

* Примечание: среднее значение температур при трех последовательных измерениях. $T_{зад}$ = 27-28 ° С.

На рисунке 3.20 представлены в графическом виде зависимости температурных максимумов от степени модифицирования и вида инструмента для матричных и углепластиковых образцов.

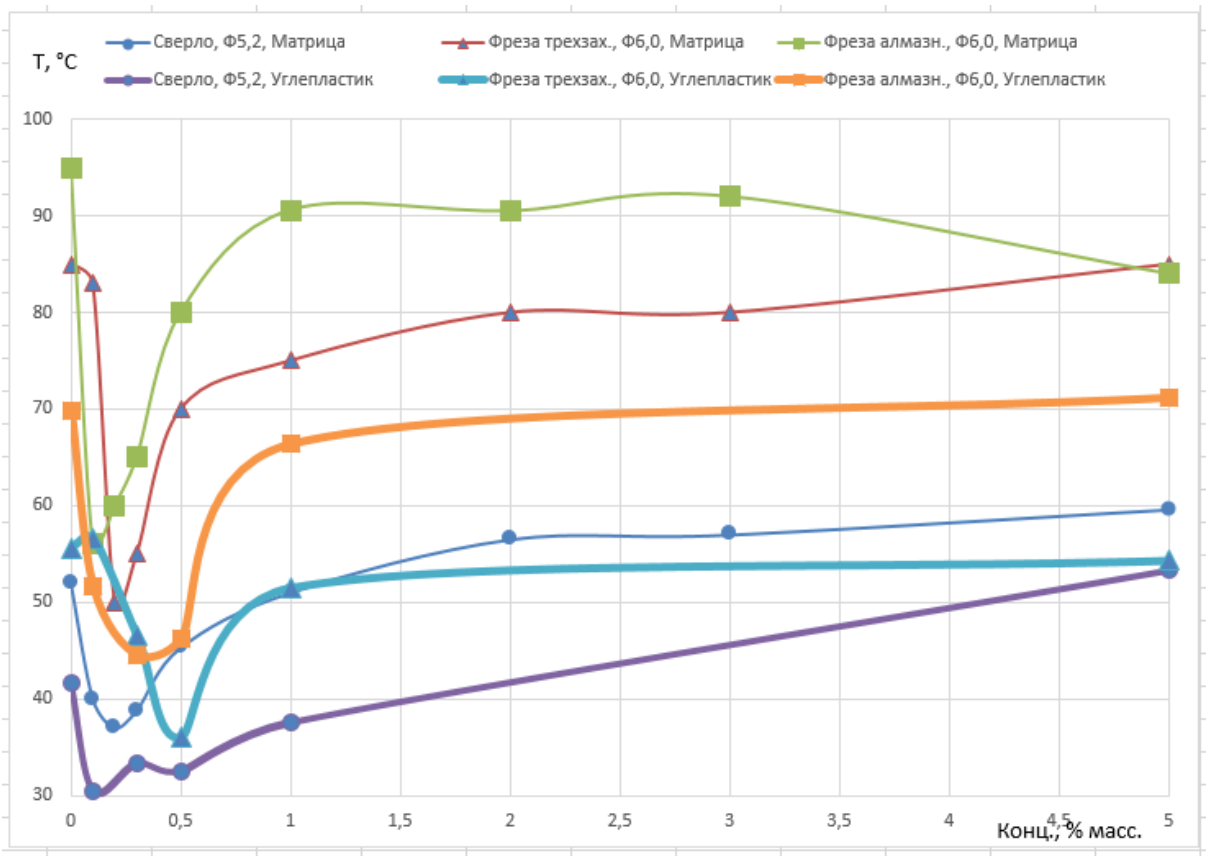


Рисунок 3.20 – Графическое представление усредненных (по трем точкам) зависимостей температурного максимума процесса образования отверстий в матричных и углепластиковых образцах. Линии для углепластиков имеют удвоенную толщину начертания

Наименьшее тепловыделение для матричных образцов зафиксировано в интервалах 0,1…0,3 % масс. в зависимости от типа применяемого инструмента. Для углепластиковых образцов на основе модифицированных матриц пики наименьшего тепловыделения смещаются несколько правее – в диапазон 0,2 … 0,5 %. Снижение максимумов температур в этих диапазонах объясняется антифрикционными свойствами модификатора СЦ: снижаются коэффициент и

силы трения. Дальнейшее повышение концентрации модификатора приводит к восстановлению или даже превышению тепловых эффектов относительно исходных немодифицированных матриц и углепластиков (0 % СЦ), что предположительно можно объяснить снижением эффективности резания при пониженных коэффициентах трения. Смещение пиков вправо и некоторое их «уширение» для углепластиковых образцов, вероятно, связано с теплофизическими свойствами наполнителя, которые изменяют условия теплоотвода из зоны контакта трущихся тел (деталь и обрабатывающий инструмент). На практике представляет интерес именно углепластик, как композиционное сочетание матрицы и углеродного наполнителя, который по результатам данных исследований имеет более выгодные значения тепловых параметров процессов механической обработки. При определенных концентрациях для каждого типа матрицы введение модификатора может служить основой для улучшения условий механической обработки, ее интенсификации и снижения количества наносимых ею микроповреждений. Данное обстоятельство будет влиять на качество образуемых отверстий, на их точность и квалитет (в т.ч. благодаря снижению термических усадок).

3.6 Оценка влияния на качество отверстий и нанесение первичной дефектности механической обработкой при образовании отверстий

Образцы после образования отверстий с помощью механической обработки исследовались на предмет приобретенных дефектов. Методы контроля (дефектоскопии) применялись в порядке увеличения чувствительности и разрешающей способности: акустическая томография, рентгенография, компьютерная рентгеновская томография, профилометрия.

3.6.1 Контроль с помощью акустической томографии

Углепластиковые образцы с отверстиями подвергались контролю с помощью акустической томографии. Был использован акустический томограф-дефектоскоп с фазированными решетками A1550 IntroVisor. Дефектоскоп A1550 с ультразвуковым преобразователем в виде многоэлементной одномерной фазированной антенной решётки (АР) при проведении контроля реализует метод синтезированной апертуры (SAFT). Принцип работы антенных решёток с синтезированной апертурой заключается в излучении и приёме ультразвуковых колебаний двумя (из 16) элементами антенной решётки с последовательным перебором пар излучающих и приёмных элементов. Сигнал, полученный с использованием каждой пары элементов, проходит аналого-цифровое преобразование и записывается в память прибора. После перебора всех возможных сочетаний «излучатель-приёмник» записанные сигналы подвергаются математической обработке, основанной на их суммировании с различными фазовыми сдвигами. Эти операции проводятся процессором дефектоскопа в реальном времени с выдачей результатов расчётов на экран прибора в виде томограммы (сечения внутренней структуры объекта контроля). Контроль показал отсутствие новых дефектов величиной площади 0,5 $см^2$ и более относительно состояния, когда акустическим импедансным методом контролировались опытные панели, из которых были вырезаны данные образцы. Выявление изменения состояния зоны на контурах сквозных отверстий данное оборудование не обеспечивает.

3.6.2 Рентгеновский контроль углепластиковых образцов

Производилась съемка углепластиковых образцов с помощью рентгеновского метода на установке Gen.Electric, «Eresco contr.», с подобранными параметрами работы:

Напряжение, U, кВ = 45;

Ток, I, А = 2;

Время выдержки, t, с = 45;

Фок.расстояние, F, мм = 735.

Общий вид рентгенограмм приведен на рисунках. дефектов структуры величиной более 0,5 мм не обнаружено. Дефектов контуров отверстий не выявлено. На рисунках 3.20 – 3.25 хорошо видны редкие стеклянные нити утка, расположенные в заготовках по схеме армирования 90 °.

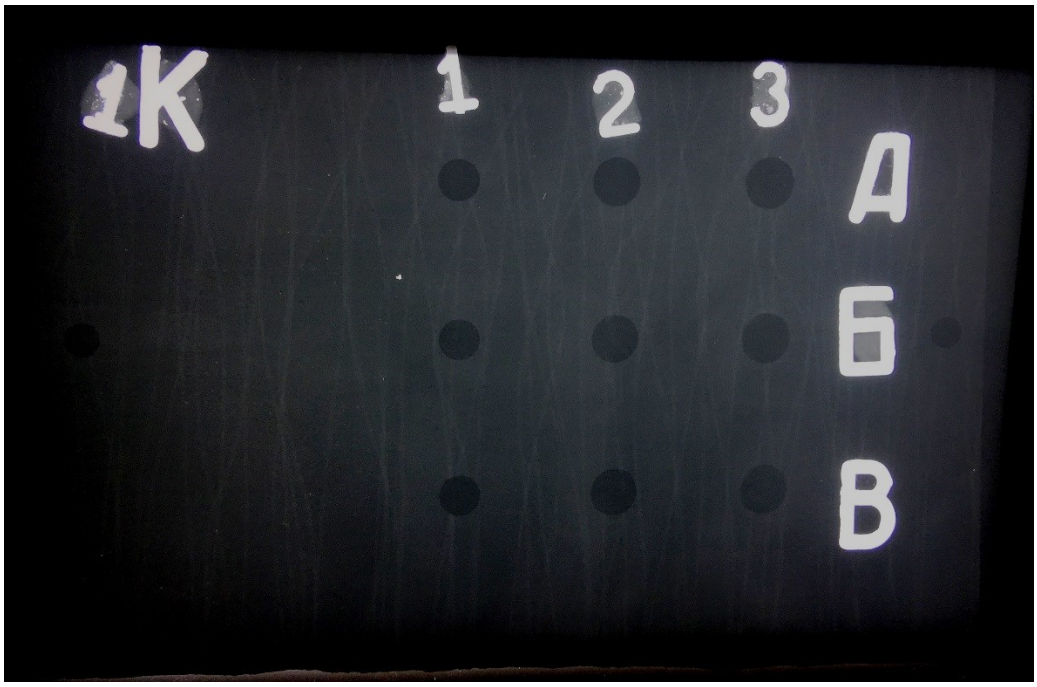


Рисунок 3.20 – Фрагмент рентгенограммы образца «1К»

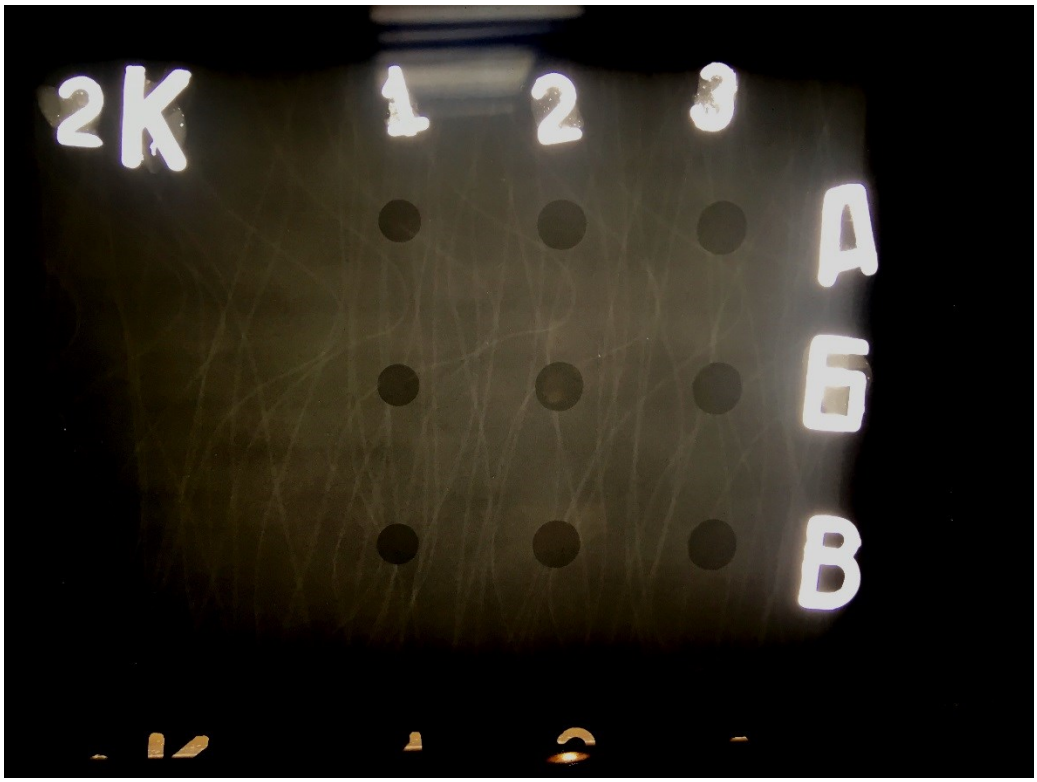


Рисунок 3.21 – Фрагмент рентгенограммы образца «2К»

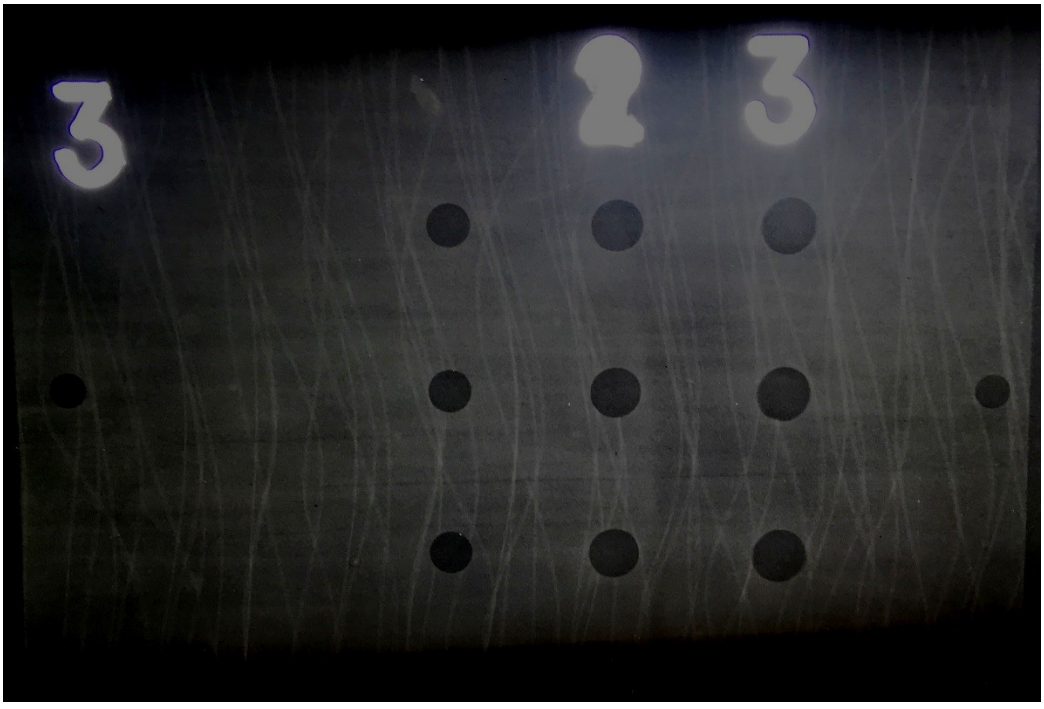


Рисунок 3.22 – Фрагмент рентгенограммы образца «3К»

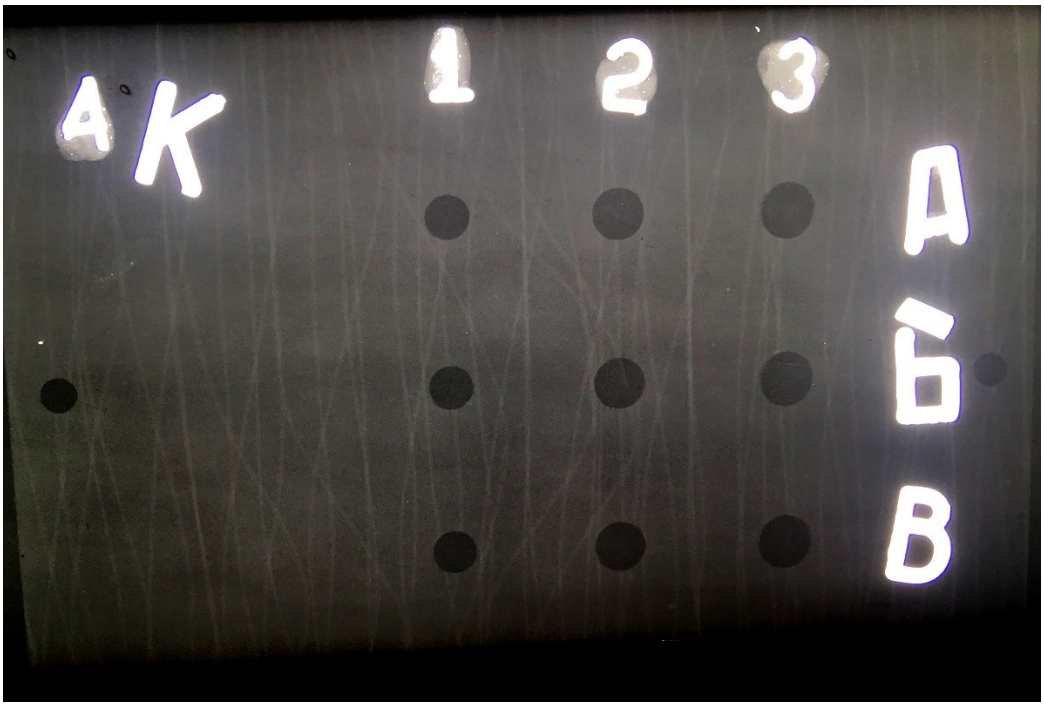


Рисунок 3.23 – Фрагмент рентгенограммы образца «4К»

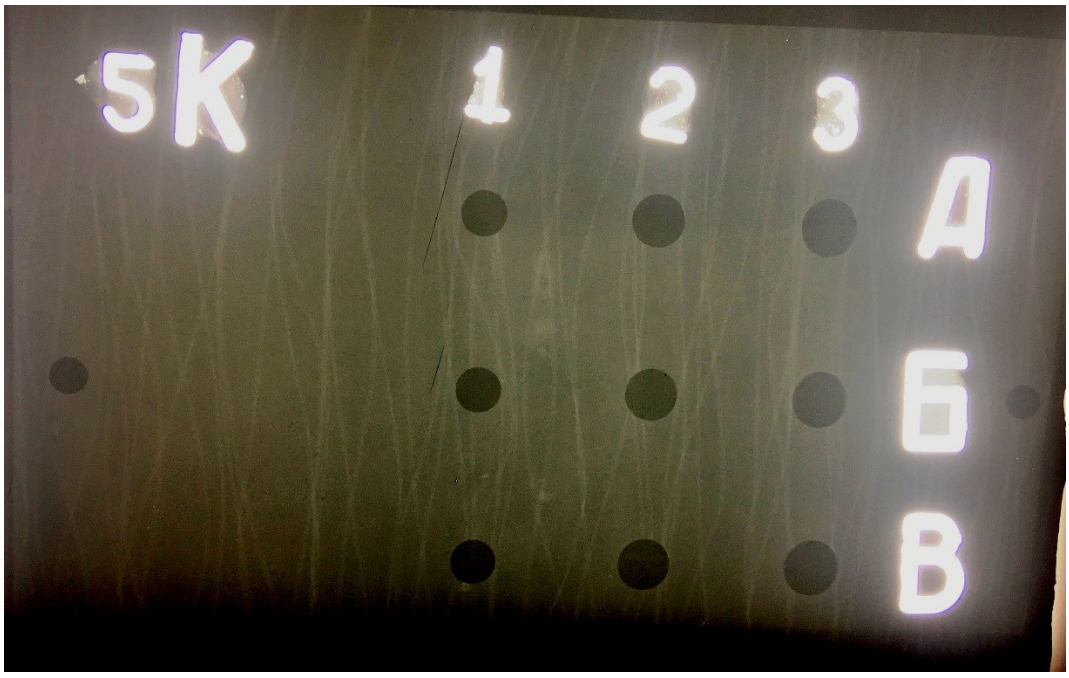


Рисунок 3.24 – Фрагмент рентгенограммы образца «5К»

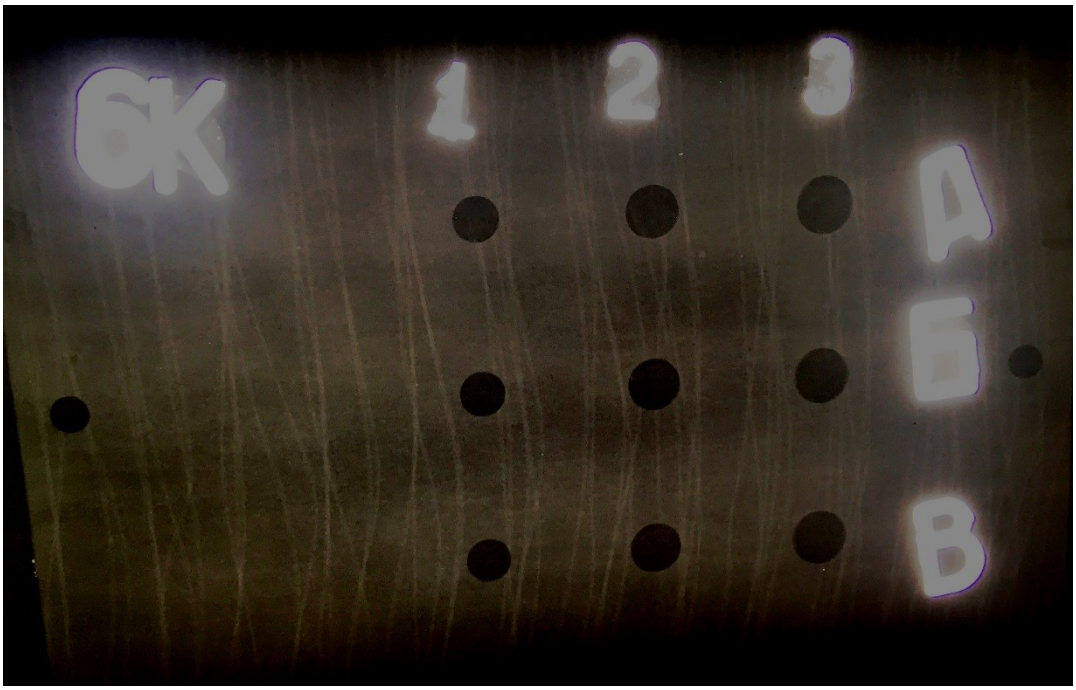


Рисунок 3.25 – Фрагмент рентгенограммы образца «6К»

3.6.3 Оценка с помощью профилометрического метода

Изготовленные образцы с отверстиями были исследованы профилометрическим методом на профилометре Mitutoyo SJ-410 в соответствии со стандартом JIS-1994. Для этого матричные образцы были рассечены поперек отверстий по диаметру. Был измерен параметр шероховатости вдоль образующей внутреннего контура отверстия. Общий вид хода измерений показан на рисунке 3.26.

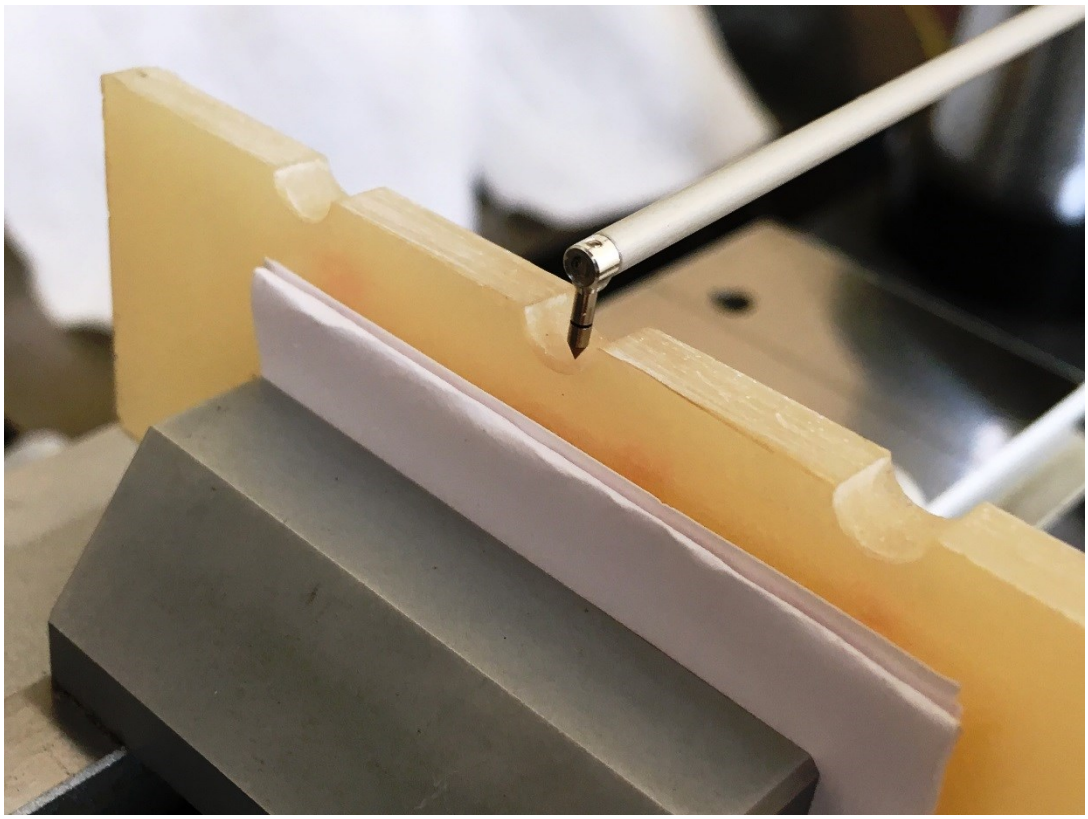


Рисунок 3.26 – Общий вид хода измерения шероховатости методом профилометрии

В таблице 3.8 представлены результаты измерений шероховатости внутреннего контура отверстий в исследуемых матричных образцах, данные представлены по отверстиям «А» - первый проход.

Таблица 3.8. Результаты измерений шероховатости поверхности отверстий в матричных образцах

Конц. модификатора, %	Шероховатость Ra, мкм	Ср.квадр.откл.σ, мкм	Размах вариации, мкм	Коэфф.вариации, %
0	1,726±0,045	0,048	0,111	2,77
0,1	1,330±0,028	0,043	0,086	3,33
0,3	1,338±0,026	0,030	0,072	2,22
2,0	1,463±0,058	0,069	0,168	4,69
5,0	1,543±0,089	0,103	0,249	6,60

На рисунке 3.27 представлены данные в графическом виде. По результатам измерений (не менее 5 измерений на каждую точку) можно наблюдать, что с добавлением модификатора в количестве 0,1 % масс. происходит снижение

параметра шероховатости (показан сплошной линией) и снижение разброса показателя (показаны пунктиром), по мере дальнейшего увеличения содержания модификатора наблюдается тенденция к замедленному росту шероховатости с увеличением разброса показателей. Данные зависимости в целом следуют тенденциям и хорошо согласуются с результатами измерений температурных показателей.

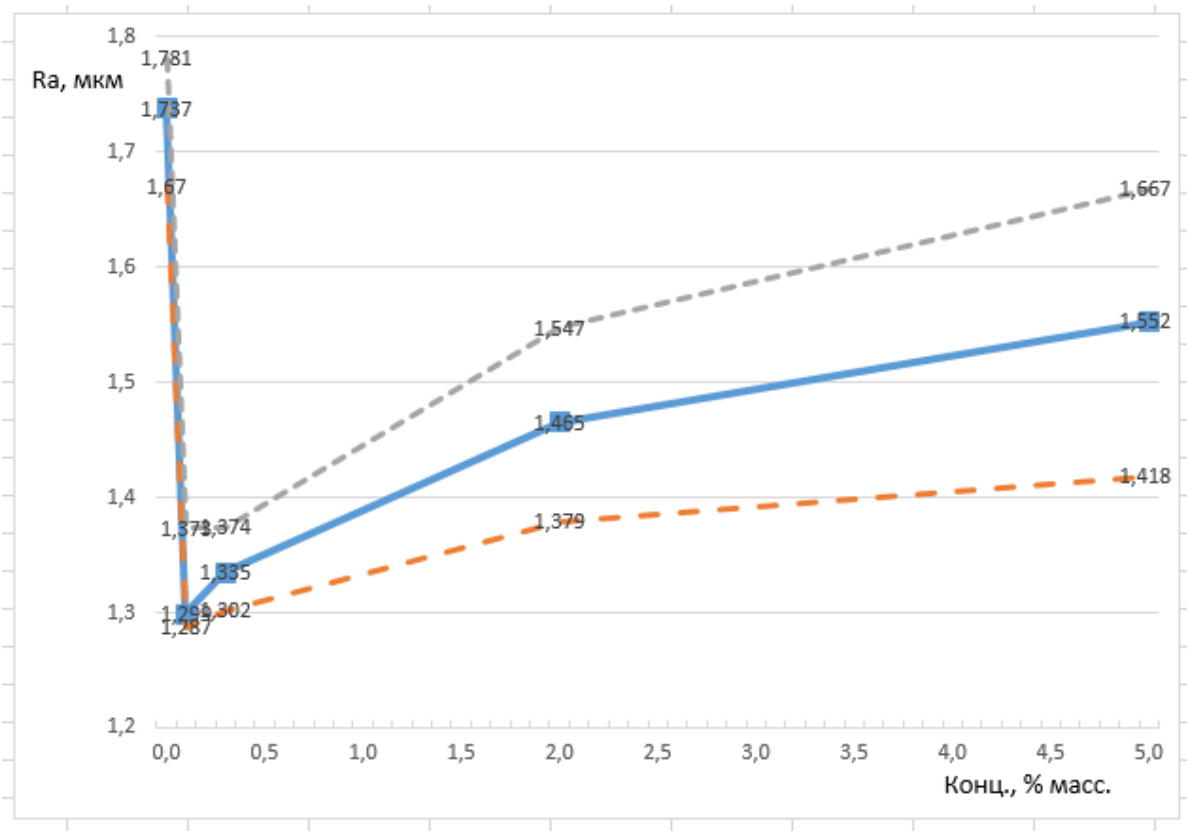


Рисунок 3.27 – Зависимость значения шероховатости и разброса показателя от концентрации модификатора

3.6.4 Исследование эпоксиуглепластиковых образцов методом компьютерной рентгеновской томографии

Контроль углепластиковых образцов проводился на высокоэнергетическом рентгеновском вычислительном томографе ВТ-600ХА. Общий вид томографа и

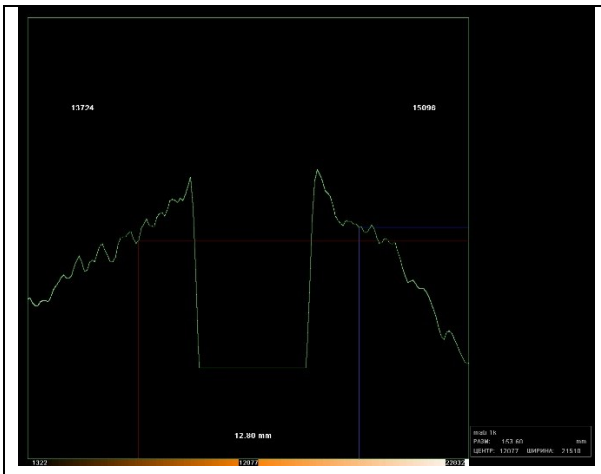
закрепленных на рабочем столе и проверяемых образцах представлен на рисунках 3.28 – 3.29.

Рисунок 3.28 - Общий вид томографа BT-600XA

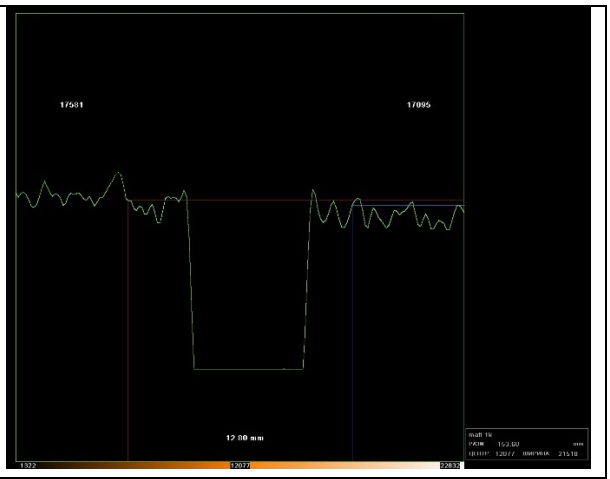
Рисунок 3.29 - Положение образцов на рабочем столе

Геометрическая чувствительность контроля, мм 0,05;
Чувствительность к локальным дефектам в виде пор, , 0,3 мм^3**,** несплошностей - 0,1 мм^3
Эффективная ширина фокусного пятна излучения, 0,3…0,1 мм.

Рисунок 3.30 – Общий вид компьютерной рентгеновской томограммы сечения «А» образцов «1к» - «6к»

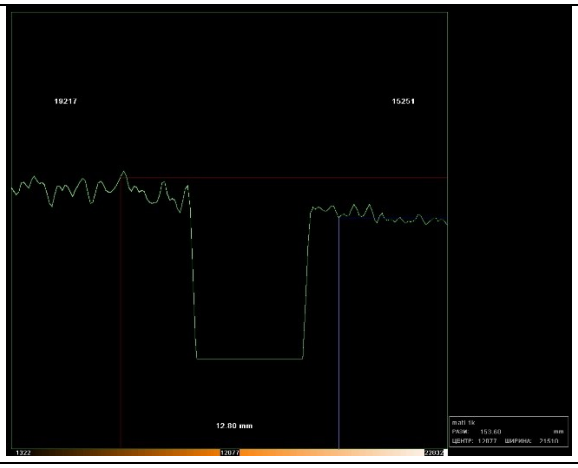


1к

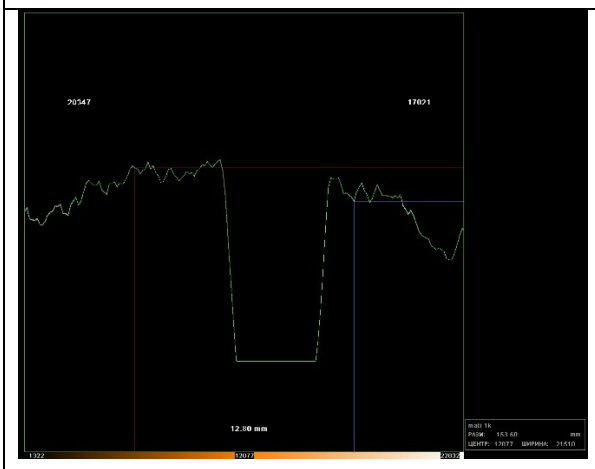


2к

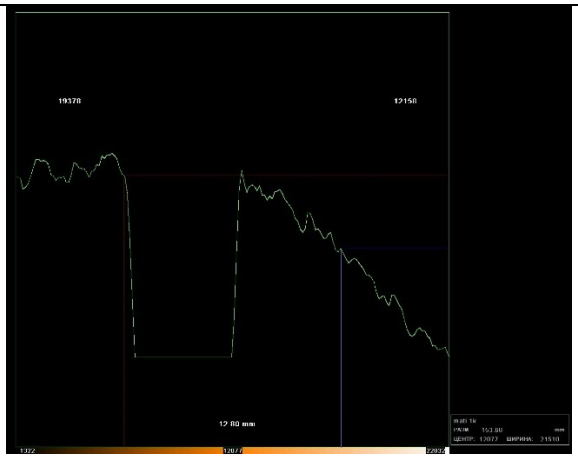
3к



4к



5к



6к

Рисунок 3.31 – Общий вид томограмм по сечениям соответствующих отверстий образцов «1к» - «6к».

При постоянной толщине исследуемого сечения образца, коэффициент ослабления зависит только от плотности материала, которая в общем виде связана с особенностями его структуры (рисунки 3.30 – 3.31). При помощи количественной

оценки коэффициентов ослабления, среднеквадратичного отклонения и отношения его к площади сечения можно оценить состояние структуры материала образцов и изменения в ней по сечению [66 - 68]. Показатель «структурная плотность», используемый для оценки качества материала с помощью метода компьютерной томографии рассматривается как плотность материала без пор. В данном методе термин структурная плотность характеризует структуру материала с учетом внутренних дефектов различного уровня и локальных уплотнений материала. Структурная плотность в отличие от традиционного понимания плотности не связана с объемом материала, а характеризует распределение материала в сечении объекта контроля [68]. Исходя из анализа томограмм и количественной оценки выходных показателей:

- среднее значение локального коэффициента ослабления ($\mu_{ср}$) (параметр определяющий рыхлость материала и учитывающий уровень отклонений от среднего значения и определяющий разнородность структуры материала), например, для образца «1к» - 15 единиц, для образцов «2к» … «4к» - 4 – 5 единиц,

можно судить о более высокой стабильности структуры материала вокруг контуров отверстий для образцов «2к», «3к», «4к».

3.6.5 Математическая модель процесса механической обработки, отражающая эффективность применения целевого модифицирования для повышения качества отверстий и снижения нанесения дефектности при механической обработке

При циклических деформациях полимерных материалов, а также при их контактировании с движущимися твердыми поверхностями (что и является основным действием при сверлении, фрезеровании) происходит многократное наложение напряжения, что должно, по всей видимости, вносить определенную специфику в закономерности разрушения. Послойное удаление материала (каждым

слоем здесь выступает снятый при каждом цикле вращения рабочего инструмента материал) – это по сути и есть специфический вид разрушения. Но разрушение это имеет локальный характер, и стоит задача обеспечить строгое сохранение «локальности этих разрушений», не допустить разрушений за пределами зоны механической обработки, например, за пределами обозначенного в чертеже отверстия. В противном случае это будет означать придание дефектности материалу вокруг отверстий, что не может не сказаться отрицательно на несущих свойствах конструкционного материала (или некоторых других, например, герметичность, электропроводимость, диэлектрическая проницаемость – для функциональных материалов).

Процесс механической обработки резанием полимерных материалов, например, при образовании отверстий, можно рассматривать, как разновидность процесса разрушения под действием постоянно вращающейся магистральной трещины с образованием двух новых поверхностей – обработанная поверхность после резания и поверхность стружки. Следовательно, следует ожидать, что понижение коэффициента трения между материалом и рабочим инструментом за счет антифрикционного модификатора, уменьшая работу, необходимую для образования новых поверхностей, снижает сопротивление резанию. В частности, косвенно это подтверждается результатами эксперимента по измерению температур в зоне резания. Это и может являться предпосылкой повышения качества обработанной резанием поверхности (основная цель модифицирования) и производительности процесса. Однако в соответствии с тем же экспериментом получены результаты, что при дальнейшем понижении коэффициента трения (т.е. при повышении концентрации антифрикционного модификатора свыше 1,0 %), показатели температур резания в зоне механической обработки опять имеют скачкообразное повышение и к величинам предельных концентраций модификатора порядка 5 % даже превышают аналогичные показатели немодифицированных композиций. Связать это явление можно с тем, что для эффективной работы режущей кромки рабочего инструмента, есть значение

коэффициента трения, свыше которого эффективность распространения магистральной трещины впереди режущего клина вдоль линии среза резко снижается. Причем по сравнительным результатам по измерению температур резания для матричных образцов и для образцов, наполненных длинноволокнистым наполнителем (углеродной лентой), справедливо это для обоих типов структур: и для непрерывных матриц, и для распределенных в объеме непрепрывных матриц длинных волокон. С той лишь разницей, что для наполненных длинноволокнистым наполнителем композиций, происходит смещение области сниженного нагрева инструмента, а значит и пониженного сопротивлению резанию к концентрациям 0,2 – 0,5 % против 0,1 – 0,3 % для ненаполненных композиций. Данный факт может быть объяснен прежде всего теплофизическими свойствами наполнителя.

Вообще, специфика механической обработки ПКМ, в частности углепластиков, имеет ряд особенностей, в т.ч. низкая теплопроводность, обусловливающая плохой отвод теплоты из зоны резания со стружкой и в обрабатываемое изделие. Известно, что при обработке высокопрочных ПКМ основная доля теплоты отводится через режущий инструмент. Согласно экпериментальным данным [1], тепловой баланс при обработке композитов следующий: в инструмент – 90 %, в стружку 5 %, в обрабатываемую заготовку - 5 %, в то время как при обработке металлов иногда до 90 % теплоты уносится стружкой и только 10 % поглощается деталью и инструментом.

Из-за низкой теплопроводности композита и высокого градиента перепада температур теплонапряженная зона локализуется вблизи зоны контакта. При этом температура нагрева обрабатываемого материала от инструмента будет прямо пропорциональна плотности теплового потока, обратно пропорциональна коэффициенту аккумуляции тепла и будет повышаться с течением времени пропорционально квадратному корню от времени нагрева [69].

$$\Theta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{q_e}{\varepsilon} \cdot \sqrt{\tau},$$

где qe – плотность теплового потока, ε – коэффициент аккумуляции тепла, $\varepsilon = \sqrt{\lambda C_v}$ (где λ – коэффициент теплопроводности, $C_м$ – удельная объемная теплоемкость), τ – время, $\tau = \frac{h_з}{S_m}$, (где $h_з$ – толщина заготовки, S_m – подача).

Толщина заготовок (образцов) была задана одинаковой (4,5±0,5) мм для матричных образцов и (2,0±0,5) мм для углепластиковых образцов и принята постоянной величиной. Параметры режима резания также были заданы постоянными (V=1000 об/мин, S = 0,3 об/мин = 30 мм/мин = 0,5 мм/с) и обеспечены программой механической обработки обрабатывающего центра (станка) с ЧПУ.

Тогда операционное время (интервал) обработки матричных образцов

$$\tau_м = \frac{h_з}{S_m} = \frac{[мм]}{\left[\frac{мм}{с}\right]} = \frac{4{,}5}{0{,}5} = 9 \text{ с};$$

и углепластиковых образцов

$$\tau_{уп} = \frac{h_з}{S_m} = \frac{[мм]}{\left[\frac{мм}{с}\right]} = \frac{2{,}0}{0{,}5} = 4 \text{ с}.$$

$\Theta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{q_e}{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{h_з}{S_m}} = \frac{6}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{q_e}{\varepsilon}$ (для матричных образцов);

$\Theta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{q_e}{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{h_з}{S_m}} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{q_e}{\varepsilon}$ (для углепластиковых образцов).

Используя выражение закона теплопроводности Фурье $\underset{q}{\rightarrow} = \chi \, grad\,(T)$ в интегральной форме $Q = -\lambda \frac{dT}{dx} S$; $-\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{Q}{S}$,

обобщим $\theta_\iota = \frac{6}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\left|-\frac{Q}{S}\right|}{\varepsilon}$, $\theta_\iota = \frac{6}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{Q}{S\varepsilon}$ (для матричных образцов);

$\theta_\iota = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\left|-\frac{Q}{S}\right|}{\varepsilon}$, $\theta_\iota = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{Q}{S\varepsilon}$ (для углепластиковых образцов).

где Θ_ι – температура i-го образца в зоне резания, S – поверхность, через которую распространяется теплота.

Выражая количество теплоты: $Q = \frac{\sqrt{\pi}}{6}\Theta_\iota S\varepsilon$ (для матричных образцов) и $Q = \frac{\sqrt{\pi}}{4}\Theta_\iota S\varepsilon$ (для углепластиковых образцов).

Таким образом при одинаковых временах механического воздействия (механической обработки) сравниваемых образцов количество тепла, выделяющееся при резании прямо пропорционально коэффициенту, отражающему геометрические размеры и коэффициенту аккумуляции тепла ($\varepsilon = \sqrt{\lambda C_v}$), связанному квадратичной зависимостью с теплофизическими константами материала.

Предполагая, что количество теплоты пропорционально температуре с коэффициентом $\frac{\sqrt{\pi}}{6}S\varepsilon$≈0.295Sε (для матричных образцов) и с коэффициентом $\frac{\sqrt{\pi}}{4}S\varepsilon$≈0.443Sε (для углепластиковых образцов), проведем оценку взаимосвязи температур резания (полученных в ходе эксперимента и осредненных по нескольким точкам) с концентрацией модификатора, которая напрямую влияет на коэффициент трения пары материал-инструмент и величину сил трения. По сведениям экспериментальных работ некоторых источников [69] для полимеров, армированных стеклянными или углеродными волокнами предельные значения силы трения по задней поверхности – Fα не должна превышать 70 – 120 Н. При этом сила трения по передней поверхности должна находиться в пределах 25 – 50 Н. Удерживание физических составляющих силы резания в указанных диапазонах позволяет минимизировать разрушение композита по поверхности раздела и уменьшить степень термодеструкции.

Полагая, что коэффициент трения снижается по мере повышения концентрации антифрикционного модификатора, и учитывая, что температуры резания, равно как и количества выделяющегося тепла снижаются для матричных образцов при повышении концентрации модификатора до 0,3 % в среднем для

разных инструментов, и при повышении концентрации для углепластиковых образцов до 0,5 % в среднем для разных инструментов, эти зависимости после достижения перегиба меняют свой характер. При дальнейшем снижении коэффициента трения (так как повышается концентрация модификатора) происходит достаточно монотонное нарастание количества выделяющегося тепла и температур при резании. Это может быть объяснено снижением эффективности механического резания при достижении определенного коэффициента трения и дальнейшем его увеличении. Причем это критическое значение коэффициента разное для разных типов инструмента, а также для типов исследуемых материалов, образцы матриц, наполненные углеродным наполнителем (углепластик) имеют смещенное в сторону увеличения значение, при котором начинается смена механизма (перегиб на зависимостях).

С учетом полученных зависимостей по температурам (их можно назвать «кажущимися», так как выше говорилось об интегральности и обобщености измеренных температур), которыми сопровождается процесс образования отверстий различными типами инструмента, с некоторыми допущениями можно спрогнозировать, каких значений возможно будут достигать температуры при получении отверстий в монолитных деталях больших толщин углепластиков на основе эпоксидных матриц (рисунок 3.32).

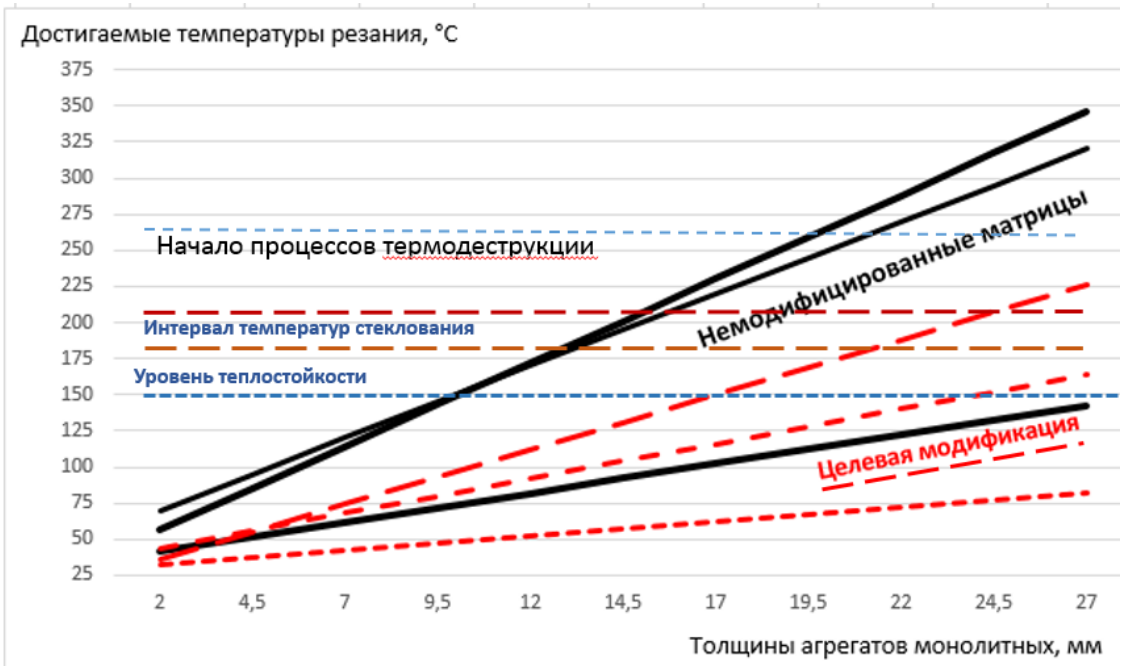


Рисунок 3.32 – Графическое представление прогнозирования достигаемых температур резания в зависимости от толщин обрабатываемых заготовок

При определенных условиях температуры достигают температур теплостойкости пластиков, в локальных зонах превышаются температуры стеклования, в элементарных объемах возможна активизация процессов термодеструкции, непосредственно влияющих на структуру и свойства композитов, как конструкционных и функциональных материалов. Это обусловливает повышение вероятности зарождения микродефектов из-за местной потери свойств материала.

С другой стороны, если обрабатываемый материал и инструмент в процессе механической обработки имеют значительный нагрев, то повышена вероятность возникновения термических напряжений и напряжений, возникающих вследствие термических усадок при остывании, что не только влияет на качество и классность получаемых отверстий, но при определенных условиях может создать предпосылки для возникновения недопустимых критических отклонений. Кроме того, повышенный нагрев отрицательно влияет на износостойкость и ресурс

дорогостоящего специализированного инструмента. Необходимо понимать также, что реальные локальные температуры резания, значения которых зафиксировать элеметарными методами не представляется возможным, могут быть значительно выше.

По сведениям экспериментальных работ некоторых источников [69] для полимеров, армированных стеклянными или углеродными волокнами предельные значения силы трения по задней поверхности – Fα не должна превышать 70 – 120 Н. При этом сила трения по передней поверхности должна находиться в пределах 25 – 50 Н. Удерживание физических составляющих силы резания в указанных диапазонах позволяет минимизировать разрушение композита по поверхности раздела и уменьшить степень термодеструкции.

Известной особенностью ПКМ являются высокие упругие свойства [1, 22]. В частности, силы резания при обработке ПКМ в 10…20 раз ниже, чем при аналогичной обработке металлов, а упругие характеристики выше, поэтому их точность обработки в меньшей мере определяется упругими деформациями системы станок – приспособление – инструмент. На точность изделий из ПКМ при их обработке резанием влияют упругие деформации самих деталей. Также определяющее значение вносит фактор анизотропии термоупругих свойств (различием коэффициентов теплового расширения в различных направлениях), поэтому вполне объяснимо, что данный фактор может вносить значительные разбросы в точностях и квалитетах отверстий в разных направлениях для анизотропных многослойных структур, особенно при значительном нагреве рабочего инструмента (сверла, фрезы, развертки или зенкера) (что подтверждает целесообразность снижения максимумов температур нагрева зоны резания).

Специфические особенности полимерной матрицы и ее низкая теплопроводность отрицательно влияют на условия работы режущего инструмента и результат механической обработки, приводят к увеличению площади контакта и сил трения между задней поверхностью инструмента и обработанной поверхностью заготовки [Головкин]. Имеет место износ по задней поверхности

режущего инструмента также вследствие упругого восстановления материала (реакции) после прохождения режущего клина. Также в [69] отмечается влияние неоднородности слоистых пластиков вследствие периодического изменения твердости при чередовании матрицы и волокна, при этом инструмент получает микроудары, что ускоряет износ и усталостное разрушение инструмента. Износ инструмента в свою очередь непосредственно влияет на точность обрабатываемых поверхностей, на соответствие эффективных (реальных) параметров технологического процесса заданным во времени.

Состояние поверхностного слоя играет очень важную роль в обеспечении высоких эксплуатационных показателей изделий. Поверхностный слой оказывает существенное влияние на многие эксплуатационные характеристики изделий: прочность, износ, диэлектрические показатели, влагопоглощение и др. Механическая обработка существенно изменяет свойства поверхностного слоя, а следовательно и эксплуатационные показатели [1]. При механической обработке происходит изменение состояния поверхностного слоя (в частности, шероховатости), перерезание армирующих волокон. К тому же повышение шероховатости ведет к увеличению влагопоглощения, что также чаще является усложняющим фактором (например, снижение температуры стеклования – а следовательно, теплостойкости).

При механической обработке ПКМ всегда имеет место деструкция полимерного связующего (и термодеструкция, и механодеструкция). Чем выше превышение температуры резания в зоне механической обработки, тем данный фактор более усиливается. В результате этих процессов образуется деструктированно-диспергированный слой, который ухудшает конструкционные и функциональные характеристики изделий из ПКМ. С эффективным применением целевого модифицирования, обеспечивающего более выгодные условия механической обработки, возможно максимально уменьшить величину этого слоя.

Выводы по главе

Опробовано применение материаловедческого подхода к решению проблемы нанесения повреждений композиционным материалам на основе эпоксидных матриц при образовании отверстий методами механической обработки. Оценено влияние введение модификатора с этой целью в диапазоне от 0,1 до 5,0 % масс. на основные технологические свойства композиции, определяющие ее приспособленность к переработке в изделия (такие как вязкость, смачивающая способность связующего и др.), влияние на кинетические параметры процессов отверждения (для возможности прогнозирования с помощи кинетической модели отверждения степени законченности процессов отверждения при соответствующих концентрациях модификатора и возможности варьирования и назначения оптимальных параметров технологического процесса формования деталей), выявлено отсутствие химического взаимодействия композиции с модификатором.

Оценено влияние модифицирования на основные механические свойства (установлено отсутствие ухудшения свойств в диапазоне 0,1 – 1,0 % модификатора), неразрушающими акустическими методами проведен неразрушающий контроль, показывающий оптимальный уровень качества изготовленных образцов.

Для оценки эффекта влияния целевого модифицирования непосредственно на изменение условий механической обработки образцов, содержащих образованные с помощью механической обработки отверстий, были изготовлены образцы и проведено измерение показателей температуры механической обработки в зоне входа режущего инструмента в заготовку. Показано, что при измерении этого параметра, как интегральной характеристики, наблюдается снижение температур (температурных максимумов) при содержании модификатора 0,1 – 0,3 % масс. в матричных образцах (в зависимости от применяемого типа инструмента) и при содержании 0,2 – 0,5 % масс. в

углепластиковых образцах (в зависимости от применяемого инструмента). Показано, что при дальнейшем увеличении концентрации происходит монотонное повышение температур, что можно связать с изменением условий резания при дальнейшем понижении коэффициента трения в паре «инструмент-заготовка» и изменением теплофизических свойств обрабатываемого материала. Проведенные измерения шероховатостей внутренних поверхностей отверстий и их результаты хорошо сходятся с результатами измерений температур. Значения шероховатости поверхностей, а также разброс данного показателя имеют тенденцию к повышению с повышением температур, зафиксированных во время механической обработки. Так, среднее значение шероховатости в отверстиях матричных (ненаполненных) образцов снижается в абсолютном выражении на 0,438±0,073 мкм и имеет тенденцию к повторному повышению на концентрациях свыше 2,0 %. Разброс вариации этих показателей также следует данным зависимостям. Оценка методом компьютерной томографии показала повышение стабильности структуры материала на краю контура отверстия после механической обработки для углепластиков, модифицированных стеаратом цинка в интервале 0,1 – 2 % масс.

Проведено прогнозирование достигаемых температур резания в зависимости от обрабатывающих инструментов и толщин обрабатываемых заготовок, показывающее возможность эффективного регулирования с помощью целевого модифицирования условий механической обработки при образовании отверстий.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА УПРОЧНЕНИЯ КРЕПЕЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ В УГЛЕПЛАСТИКАХ

Для соединения высоконагруженных конструкций из ПКМ чаще всего используются способы с применением различных видов болтов. Сборка с помощью болтов позволяет получить разъемное соединение, не требующее нарезания резьбы в соединяемых деталях. Болтовые соединения обладают наибольшей технологичностью и являются в целом наиболее эффективными для ПКМ, особенно для соединения пластин с толщиной более 3,0 мм [1]. Это предопределило увеличение объема их применения в сильно нагруженных конструкциях.

Одним из самых распространенных в авиационной промышленности конструктивных вариантов оформления отверстия под крепеж в монолитном углепластике конструкционного назначения является отверстие диаметром 6 мм с конусной зенкованной частью под потайную головку болта (рисунок 4.1).

В целях снижения влияния дефектов и повреждений зону крепежных отверстий, полученных на этапах производства и/или эксплуатации деталей, узлов и агрегатов, содержащих эпоксидные углепластики, разрабатывается технологическое (конструктивно-технологическое) решение по подкреплению/ремонту крепежных отверстий. Базовый вариант решения состоит в установке по контуру отверстия композитной стеклопластиковой втулки с помощью термокомпрессионного способа формования.

Несущая способность детали или агрегата с отверстием под крепеж и механического крепежного соединения зависит от напряженно-деформированного состояния (НДС) и сопутствующей ему концентрации напряжений в зоне крепежа. В общем случае на нее влияет комплекс эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов. Общее рассмотрение эксплуатационных факторов, влияющих на прочность соединений, показывает, что на стадии проектирования часть из них известна, а другая часть возникает в процессе реализации и отработки

спроектированной конструкции [70]. В связи с этим необходимо посредством конструктивно-технологических мероприятий организовать НДС в зоне крепежных точек таким образом, чтобы получить повышение несущей способности.

4.1 Требования, предъявляемые к методу установки подкрепляющего элемента, и базирующихся на их основе основные принципы его формирования

Одним из самых распространенных в авиационной промышленности конструктивных вариантов оформления отверстия под крепеж в монолитном углепластике конструкционного назначения является отверстие диаметром 6 мм с конусной зенкованной частью под потайную головку болта (рисунок 4.1).

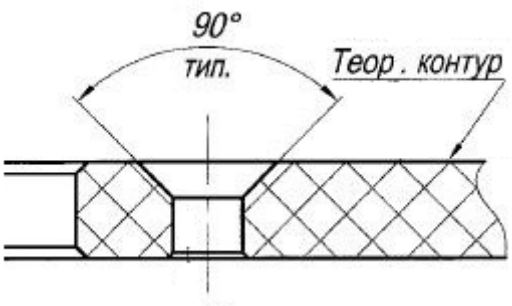


Рисунок 4.1 – Типовое для авиационной промышленности отверстие под крепеж в углепластиковом монолитном агрегате

Большое количество различных факторов влияет на качество внутренних контуров крепежных отверстий, может иметь место большой разброс геометрических отклонений и дефектности, приобретенных как на стадии изготовления, так и на стадии эксплуатации. Широкий разброс этих показателей обуславливает необходимость «универсальности» разрабатываемого метода по достижению итоговых оптимальных показателей установленного элемента в обозначенные крепежные отверстия. Метод должен обеспечивать:

- нивелирование имеющихся геометрических отклонений исходного отверстия, появившихся вследствие, например, отклонений в ходе

технологического процесса образования отверстий с помощью механической обработки или эксплуатационного ресурсного износа (увеличение диаметра отверстия, снижение его точности, отклонение от правильной формы, например, овализация);

- нивелирование имеющихся и зарождающихся микроповреждений, приобретенных в результате механической обработки, появившихся или развившихся в ходе эксплуатации изделия;

- нивелирование (снижение влияния на несущую способность) дефектов типа расслоения, возникающих вследствие установки крепежных элементов и снижение интенсивности их роста в процессе эксплуатации;

- создание оптимального НДС в зоне отверстий, в т.ч. в условиях работы крепежных соединений с металлическим крепежом.

Для выполнения указанных предъявляемых требований метод должен обеспечивать достаточную прочность как самого подкрепляющего элемента (втулки), так и высокое качество механической связи с подкрепляемым элементом. Этой цели служит прежде всего использование в качестве материала втулок современных технологичных композиционных материалов, например конструкционных стеклопластиков, перерабатываемых по препреговой технологии. Для создания прочной структуры подкрепляющего элемента и прочной связи с подкрепляемым элементом в методе необходимо обеспечивать достаточный уровень давления формования элемента, формуемого по месту, что должно обеспечить качественную хорошо уплотненную структуру втулки и согласованность ее формы с «индивидуальными особенностями» каждого отверстия. Применение полуфабрикатов стеклопластика – препрегов, с повышенным содержанием (наносом) связующего [32 - 33], которое в достаточно широком диапазоне снижает вязкость в процессе формования, должно обеспечить выравнивание микронеровностей, выходящих на контур подкрепляемого отверстия, а также частично заполнить дефекты, типа микротрещин, идущих в радиальном направлении от контура отверстия, и расслоения (несплошности, образовавшиеся между слоями пластика).

Основным принципом формирования подкрепляющего элемента в виде втулки является свободное введение заготовки в подготовленное отверстие, высокая степень уплотнения прежде всего в радиальном направлении и достаточное усилие прижима заготовки при формовании к стенкам подкрепляемого отверстия. Таким образом главной физической основой принципа должна являться радиальная раздача (расширение) внутренней формообразующей оснастки, сообщающей давление формования заготовке в радиальном направлении. После проведения процесса отверждения оснастка должна иметь возможность свободного вывода из сборки.

Предъявляемым к процессу требованиям соответствует метод термокомпрессионного формования, основной принцип которого заключается в создании давления формования за счет эластичных формующих элементов (ЭФЭ), изготовленных из материалов с высоким КЛТР. К таким материалам относят прежде всего резины.

4.2 Выбор и назначение материалов эластичных формующих элементов и основные технические требования.

Для обеспечения применения в качестве материала подкрепляющих втулок эпоксидных стеклопластиков (широко применяемых в конструкциях современных авиационных комплексов), перерабатываемых в основном по препреговой технологии, типа ВПС-32К10 на связующем ВСК-14-4, необходимо выбрать материал ЭФЭ с рабочей температурой, удовлетворяющей диапазону температур переработки данных материалов. Базовый режим отверждения стеклопластиков типа ВПС-32 проводится при температуре (180±5) °С в течение 3 часов. В перспективе возможно использование материалов со сниженной температурой переработки, например, для материалов на основе связующих ВСК-14-5м – 150 °С и ниже.

Основная задача при выборе и изготовлении (при необходимости) оснастки – воспроизведение внутреннего контура втулки в необжатом состоянии заготовки

(возможность сборки неотвержденной заготовки втулки, например методом намотки) и создание необходимого давления формования при нагреве оправок до температуры отверждения. Решение поставленной задачи заключается в правильном подборе геометрических размеров и достижении необходимого КЛТР в изготовленных оправках. Материал для использования в качестве ЭФЭ должен обладать следующими свойствами:

- высокой эластичностью, необходимой для равномерного распределения давления формования;

- значениями КЛТР в пределах $2 \cdot 10^{-4}$ - $4 \cdot 10^{-4}$ $К^{-1}$ [71], стабильными в процессе применения;

- стойкостью к продуктам, выделяющимся в процессе формования;

- стабильностью свойств при циклическом воздействии температур отверждения и давлениях формования;

- твердостью в пределах 35 – 50 единиц по Шору А [71];

- хорошей теплопроводностью;

- приспособленностью к нанесению разделительных антиадгезионных слоев;

- высокой степенью готовности для применения.

Анализ ассортимента эластомеров показал, что указанным техническим требованиям удовлетворяют только материалы на основе кремнийорганических резин. По результатам поиска среди ассортимента выпускаемых промышленностью материалов выбраны несколько материалов, удовлетворяющих требованиям (таблица 4.1).

Таблица 4.1. Свойства выпускаемых кремнийорганических резин на основе силоксанового каучука производства «НИИ РП»

Марка	ИРП-1265	СП-111	СП-121
Нормативный документ	ТУ 38.0051166-98	ТУ 2512-282-00152106-98, ТУ 2512-103-38220721-2016	ТУ 2512-282-00152106-98, ТУ 2512-103-38220721-2016
Рабочая температура, °С	-60 …+250	-60 …+230	-60 …+230
КЛТР, $10^4\,^{\circ}C^{-1}$	2,5-3	3-5,5	3-6
Плотность, г/см^3	1,2	1,12	1,16
Твердость по Шору А, усл.единиц	36 - 48	38 - 48	48 - 58
Относительное удлинение при разрыве, не менее, %	250	500	350
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	2,45	8,0	6,5
Цвет	Белый, красный	Белый	Белый
Коррозионная активность	Не вызывает коррозии незащищенных сталей, алюминиевых сплавов	Не вызывает коррозии незащищенных сталей, алюминиевых сплавов	Не вызывает коррозии незащищенных сталей, алюминиевых сплавов

Данные марки кремнийорганических резин поставляются «НИИ РП» в том числе в виде профилей и трубок различных диаметров. Для решения прикладной задачи изготовления эластичных формующих элементов – оправок для термокомпрессионного формования наиболее эффективным будет использование трубок соответствующего диаметра совместно с ограничивающе-зажимным приспособлением в виде нестандартного болта номинальным диаметром 4 мм. При этом подбор внутреннего и внешнего диаметров трубки относится к назначению параметров технологического процесса, так как эти величины, наряду с температурными режимами переработки, впрямую будут влиять на создаваемые давления формования. Трубка длиной, соответствующей толщине панели по месту установки втулки, надевается на стержень болта в гладкой его части с предварительно нанесенным разделительным слоем, представляя собой простейший вариант оснастки (оправки) для термокомпрессионного формования

подкрепляющих втулок по месту в монолитных панелях толщинами от 3,0 мм до 8,0 мм с возможностью двухстороннего подхода (представлен на рисунке 4.2).

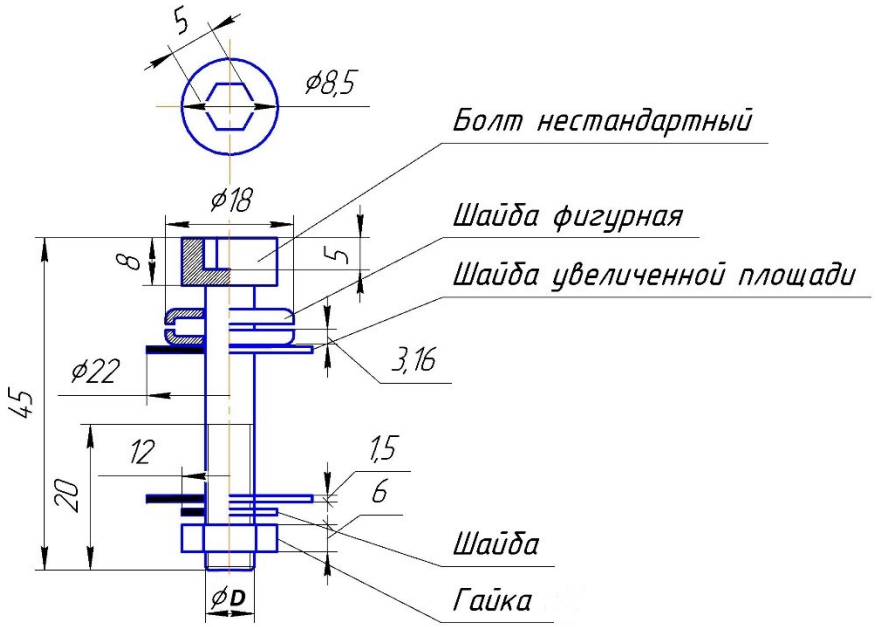


Рисунок 4.2 – Вариант ограничивающе-зажимного приспособления для оснастки при термокомпрессионном методе формования

Заготовка подкрепляющего элемента [72 - 73] надевается на приспособление в сборе с кремнийорганической трубкой, вводится в отверстие в агрегате, и производится замыкающее затягивание гайки, для обеспечения позиционирования заготовки втулки в отверстии агрегата и герметичности в объеме формования.

При необходимости для изготовления оправок с предварительным формообразованием могут быть использованы многокомпонентные кремнийорганические компаунды марок «Виксинт У-2-28» и «Пентэласт-750А» (таблица 4.2).

Таблица 4.2. Свойства кремнийорганических герметиков

Марка компаунда	Виксинт У-2-28	Пентэласт-750А
Нормативная документация	ТУ - 1-595-28-701-2003, ТУ 38.303-04-04-90	ТУ 2257-295-40245042-2015 и.1
Количество компонентов и их соотношения	Три: паста У-2 – 100 м.ч. + катализатор № 28 – 1-2 м.ч. ГФЖ 136-41 – 0,7-2 м.ч.	Два: компонент А – 1 м.ч. компонент Б – 1 м.ч.
Рабочая температура, °С	-60 …+250	-60 …+250
КЛТР, 104 °С-1	3-6	2,5
Плотность, г/см3	2,2	1,12
Твердость по Шору А, усл.единиц	35-50	38-43
Относительное удлинение при разрыве, не менее, %	220	300-500
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	1,9	3,0-3,5
Режим переработки	24 – 72 часа при 20 °С	24 часа при 25 °С с приобретением максимальных свойств через 72 часа
Усадка при переработке, %	Не более 4	Менее 0,05
Цвет	Розовый или белый	Белый
Коррозионная активность	не вызывает коррозии алюминиевых сплавов, магниевых сплавов оксидированных, сталей нержавеющих и углеродистых, стали кадмированной и оцинкованной пассивированной и титановых сплавов	не вызывает коррозии алюминиевых сплавов, магниевых сплавов оксидированных, сталей нержавеющих и углеродистых, стали кадмированной и оцинкованной пассивированной и титановых сплавов

4.3 Проектирование технологического процесса и назначение основных параметров технологического процесса компрессионного формования

Приведен пример типового технологического процесса установки втулки с помощью термокомпрессионного метода и рассчитаны его основные параметры.

Предлагаемый метод установки композитной втулки представлен на блок-схеме (рисунок 4.3) и подробнее описан ниже.

Рисунок 4.3 – Блок-схема, укрупненно отражающая технологический процесс установки композитной втулки термокомпрессионным методом [72 - 76]

4.3.1 Подготовительные этапы

1 Исходя из конструктивных особенностей агрегата, предназначенного для установки втулки, механическими методами производится подготовка посадочного отверстия для установки втулки. Например, в случае панели из углепластика, состоящей из порядка 30 монослоев, в зависимости от поля сил, действующих в данной зоне, может быть назначен диаметр посадочного отверстия под втулку 7,0 мм (диаметр отверстия под крепеж 6,0 мм). Разделку отверстия до 7,0 мм производят типовым для данного материала специальным инструментом и по назначенным режимам резания (сверления, развертывания, зенкование).

2 В зависимости от назначения и конструктивного оформления подкрепляющей композитной втулки, назначается материал и технология формования втулки из него. Термокомпрессионным способом предусмотрено формование втулок из недоотвержденных заготовок пресс-материалов (хаотично армированных) либо из заготовок волокнистых ПКМ (стеклопластики и др.).

В первом случае могут применяться заготовки из пресс-материалов, например, пресс-волокнитов ДСВ-2р, которые сформированы, но имеют высокую остаточную жизнеспособность благодаря подобранному режиму изготовления заготовок (таблетирования).

В случае применения заготовок волокнистых ПКМ, например стеклопластиков, задается схема армирования самой заготовки. На рисунке 4.4 приведен эскиз исполнения втулки, при этом задана схема армирования – радиальная.

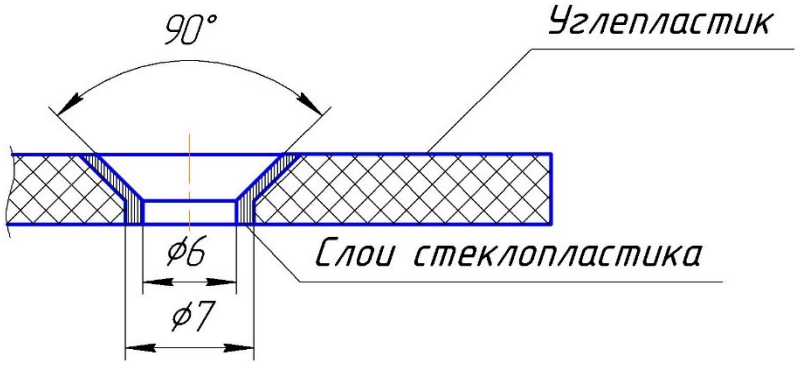


Рисунок 4.4 – Эскиз исполнения отверстия под крепеж с стеклопластиковой втулкой

Для обеспечения заданной схемы армирования необходимо раскроить заготовку полуфабриката стеклопластика (препрега) соответствующим образом. На рисунке 4.5 приведен пример раскроя заготовки.

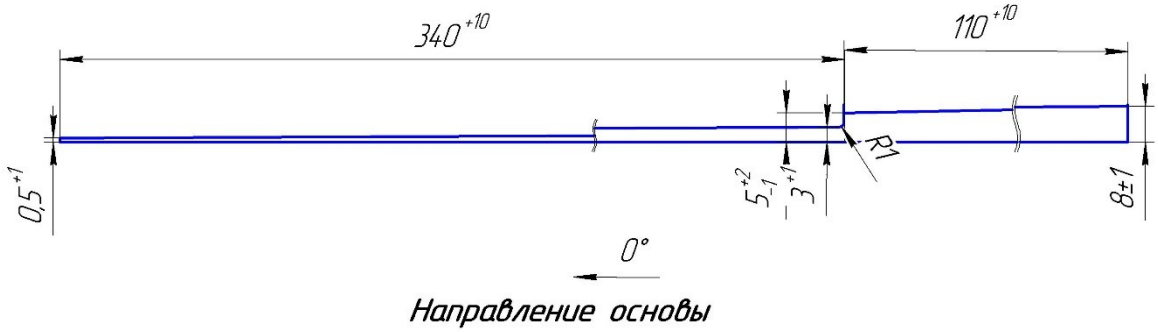


Рисунок 4.5 – Схема раскроя препрега для заготовки

При плотной намотке данной заготовки на цилиндрическую оправку (начиная с широкого края) получается заготовка, по форме являющаяся ответной подготовленному по п.1 отверстию.

4.3.2 Основной этап

Основной этап заключается непосредственно в установке и формовании композитной втулки в подготовленном отверстии. Выполненные заготовки надеваются на оправки, представляющие собой цилиндрические элементы, содержащие материал, способный при нагревании расширяться в значительной степени. Эластичный формующий элемент (ЭФЭ) выполняется из кремнийорганической резины профилированного типа с внешним диаметром, равным внутреннему диаметру заготовки втулки. За счет эластичности оправки, компенсируется зазор между заготовкой втулки и оправкой.

Коэффициент термокомпрессии материала ЭФЭ характеризующий прирост давления внутри замкнутого объема, в котором находится ЭФЭ, при его нагреве на 1 °С, МПа/ °С:

$$k_p = \frac{\alpha \mathrm{E}}{1-2\mu},$$

где α, Е, μ – КЛТР, модуль упругости и коэффициент Пуассона, ΔТ – разность между текущей температурой Т и температурой T_δ, при которой исчезает зазор между ЭФЭ и ограничительной частью оснастки.

Так, для оправки из кремнийорганической резины марки СП-111 (или аналогичных) коэффициент термокомпрессии:

$$k_{\text{резКО}} = \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}6}{1-2 \cdot 0{,}49} \approx 0{,}024 \text{ МПа/°С}.$$

Зазор δ между заготовкой втулки (слоями препрега стеклопластика) и кромками отверстия в детали, который необходимо компенсировать для того, чтобы формующий элемент начал оказывать контактное давление, принят в районе 0,1 – 0,2 мм – выход попавшего между слоями воздуха и излишков связующего.

Так температура T_δ, при которой исчезает зазор между ЭФЭ и ограничительной частью формующей поверхности:

$T_\delta = T_{нач.} + \Delta T_{комп} = 20 + \delta/(\alpha \cdot d_1)$

где $T_{нач.}$ – температура начала режима формования,

$\Delta T_{комп}$ – приращение температуры для компенсации зазора,

δ – зазор,

α – КЛТР, d_1 – внешний диаметр оправки формующего элемента.

Для резинового ЭФЭ

$$T_\delta = 20 + \frac{\delta}{\alpha \cdot d_1} = 20 + \frac{0.1}{3 \cdot 10^{-4} \cdot 6} \cong 20 + 55{,}6 \cong 75{,}6\ ^\circ C.$$

Таким образом, в ходе режима нагрева сборки при температуре порядка 76 °С компенсируется зазор, и начнется прирост формующего давления:

$$p = k_{\text{резКО}}(T_{max} - T_\delta) = 0{,}006 \cdot ((180 \pm 5) - 76) \cong 0{,}62 \text{ МПа}.$$

Далее производят нагрев оправок и заготовок втулок, спозиционированных в отверстиях основной детали, фиксируют и зажимают оправки. Это может быть как нагрев всей детали (термошкафу), так и использование специальных локальных нагревателей внутри оправки.

После проведения режима отверждения (формования) втулки с соответствующей записью основных технологических параметров (температура, время, скорость нагрева и охлаждения), производят снятие оправки из отформованного контура втулки в отверстии (рисунок 4.6). При этом легкость снятия обеспечивается антиадгезионным покрытием, нанесенным на оправку, а также уменьшением объема в связи с охлаждением и эластичностью кремнийорганической оправки. Данная оправка подлежит многократному использованию, прежде чем ее термокомпрессионные свойства ухудшатся.

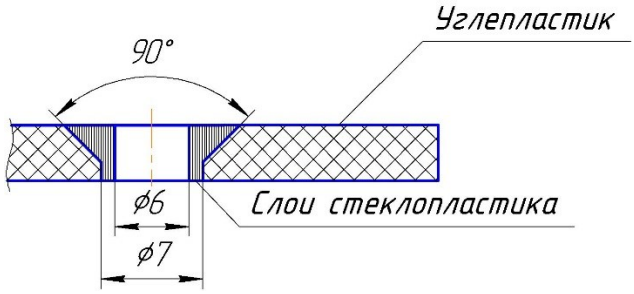


Рисунок 4.6 – Эскиз варианта исполнения установленной втулки до механической обработки

4.3.3 Заключительные этапы

1 Удаление излишков отвержденного связующего в виде натеков производится типовыми методами механической обработки

2 В соответствии с конструкторской документацией (КД) производится механическая обработка отверстия с установленной втулкой. По заданным режимам проводятся сверление, развертывание, зенкование

3 Если это предусмотрено документацией, проводятся операции нанесения лакокрасочного покрытия (ЛКП), маркирование.

Проведена дефектоскопия изготовленных образцов с помощью акустических методов контроля. Качество проформовки установленной втулки возможно проверить только разрезав образцы-свидетели.

Один из опытных образцов, изготовленный с применением данного метода, с установленной стеклопластиковой втулкой показан на рисунках 4.7 - 4.8.

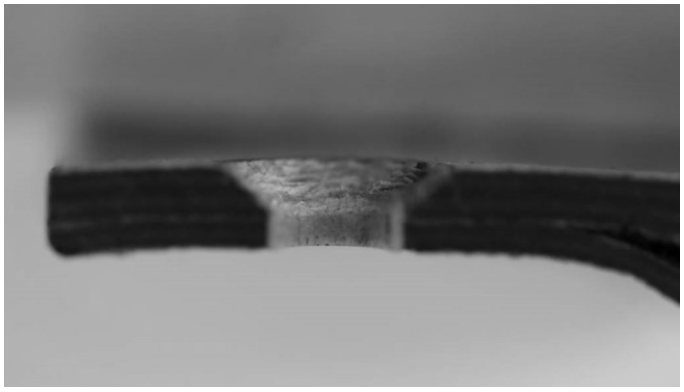


Рисунок 4.7 – Поперечное сечение установленной стеклопластиковой втулки в монолитную углепластиковую панель

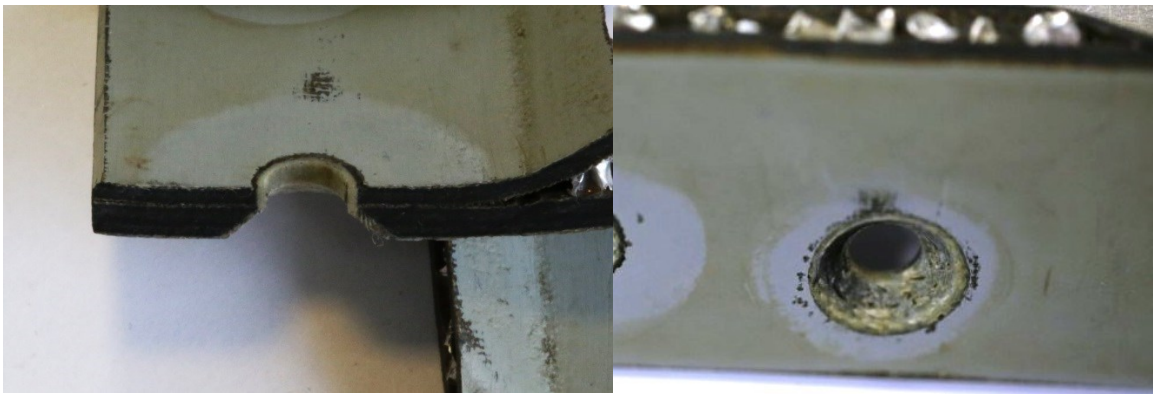


Рисунок 4.8 – Поперечное сечение установленной стеклопластиковой втулки в монолитную углепластиковую панель

Предложенный метод установки стеклопластиковых втулок, благодаря полученным вполне удовлетворяющим результатам, можно рекомендовать к применению в ограниченных количествах. Прежде всего это связано с вопросами технологичности, т.е. приспособленностью метода к возможности обеспечения необходимой (требуемой) производительности и тиражности, при максимальной экономии трудовых, материальных и временных ресурсов с заданным уровнем качества.

Для более широкого применения данного метода рационально провести мероприятия:

- спроектировать, изготовить и поставить производству шаблоны раскроя препрегов для изготовления заготовок втулок, которые в последующем будут устанавливаться при ремонте отверстий под крепеж;

- при определенном повышении тиражности изготовления ремонтных втулок создать управляющий алгоритм (программу) раскроя препрега для машин автоматизированного раскроя препрегов (с возможными последующими их упаковкой и транспортировкой к месту применения штучно или в виде комплектов). Повышение доли автоматизации при определенном тираже даст

снижение первичной себестоимости заготовок, улучшит качество, повторяемость, повысит производительность и культуру производства;

- для проведения ремонта деталей и агрегатов, имеющих сравнительно большие габариты предусмотреть возможность применения готовых решений по локальному нагреву зоны ремонта: «термоодеяла» («термоматы» - рисунок 4.9), устройства для индукционного локального нагрева (рисунок 28), так называемые «термоболты» (рисунок 4.10), устройства – компактные комплекты с возможностью электрического питания, создания разряжения, регистрации параметров процессов типа «Heatcon Brisk», консоли типа «Anita SteVik» (рисунок 4.11) [77 - 78]. Предусмотреть проектирование и изготовление необходимого количества терморасширяющихся оправок со встроенными омическими нагревателями, подключать которые рационально к имеющимся компактным комплектам для ремонта.

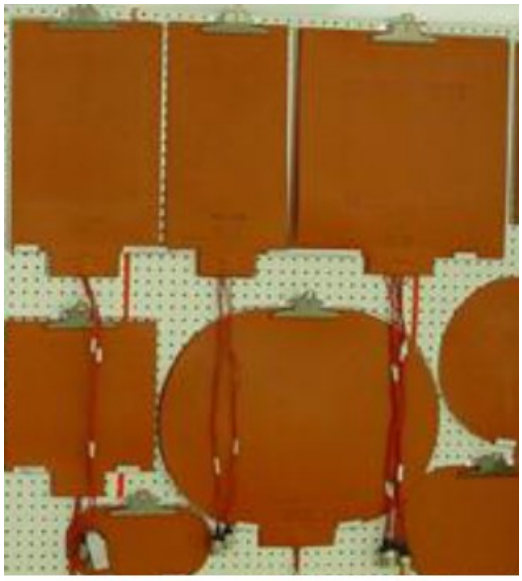


Рисунок 4.8 – Промышленные образцы устройств для локального нагрева – «термоматы»

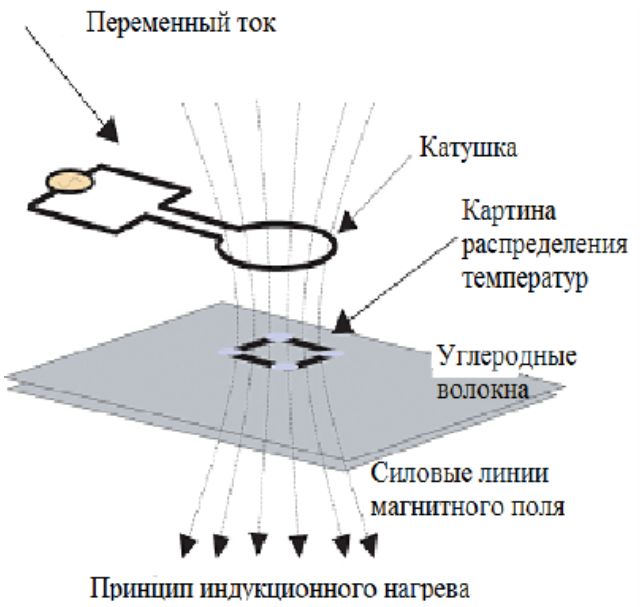


Рисунок 4.9 – Принцип действия устройств индукционного локального нагрева

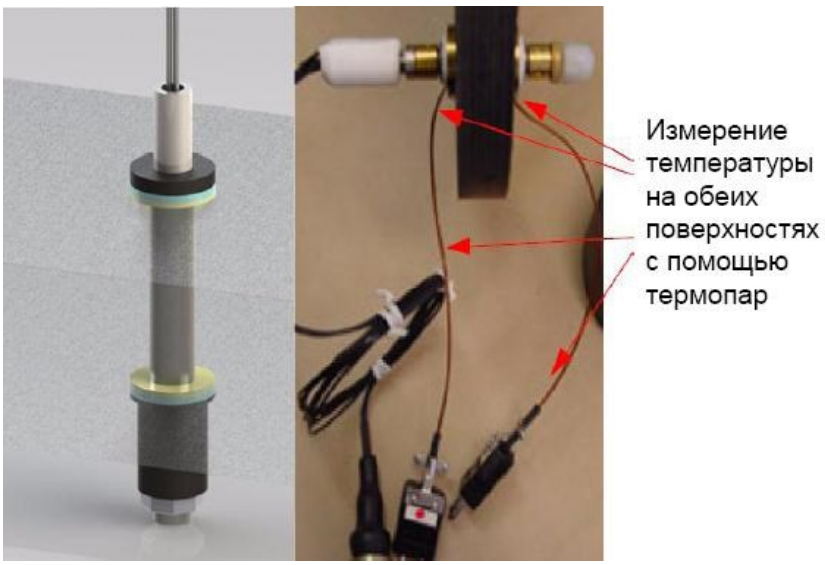


Рисунок 4.10 – Зарубежные промышленные прототипы «термоболтов» - устройств подогреваемой оснастки

Рисунок 4.11 – Зарубежные промышленные образцы компактного оборудования – консолей обеспечения технологических параметров и их регистрации «Анита» в действии [77]

Выводы по главе

Высокая весовая эффективность, несущая способность и ресурс разъемных и неразъемных точечных соединений (болтовые и заклепочные) деталей, узлов и агрегатов из ПКМ обусловили высокие объемы их применения в сильно нагруженных ответственных конструкциях. В целях снижения влияния дефектов и повреждений зону крепежных отверстий, полученных на этапах производства и/или эксплуатации деталей, узлов и агрегатов, содержащих эпоксидные углепластики, разработано технологическое (конструктивно-технологическое) решение по подкреплению/ремонту крепежных отверстий. Базовый вариант решения состоит в установке по контуру отверстия композитной стеклопластиковой втулки с помощью термокомпрессионного способа формования.

Обозначены основные требования, предъявляемые к методу установки подкрепляющего элемента, и основные принципы его формирования. показано, что метод должен обеспечивать:

- нивелирование имеющихся геометрических отклонений исходного отверстия, появившихся вследствие, например, отклонений в ходе технологического процесса образования отверстий с помощью механической обработки или эксплуатационного ресурсного износа (увеличение диаметра отверстия, снижение его точности, отклонение от правильной формы, например, овализация);

- нивелирование имеющихся и зарождающихся микроповреждений, приобретенных в результате механической обработки, появившихся или развившихся в ходе эксплуатации изделия;

- нивелирование (снижение влияния на несущую способность) дефектов типа расслоения, возникающих вследствие установки крепежных элементов и снижение интенсивности их роста в процессе эксплуатации;

- создание оптимального НДС в зоне отверстий, в т.ч. в условиях работы крепежных соединений с металлическим крепежом.

Основным принципом формирования подкрепляющего элемента в виде втулки является свободное введение заготовки в подготовленное отверстие, высокая степень уплотнения прежде всего в радиальном направлении и достаточное усилие прижима заготовки при формовании к стенкам подкрепляемого отверстия.

Проведен выбор и назначение эластичных формующих элементов и предъявляемых к ним основных технических требований. Материал для использования в качестве ЭФЭ должен обладать следующими свойствами:

- высокой эластичностью, необходимой для равномерного распределения давления формования;

- значениями КЛТР в пределах $2 \cdot 10^{-4}$ - $4 \cdot 10^{-4}$ $К^{-1,}$ стабильными в процессе применения;

- стойкостью к продуктам, выделяющимся в процессе формования;

- стабильностью свойств при циклическом воздействии температур отверждения и давлениях формования;

- твердостью в пределах 35 – 50 единиц по Шору А;

- хорошей теплопроводностью;

- приспособленностью к нанесению разделительных антиадгезионных слоев;

- высокой степенью готовности для применения.

Показан пример спроектированного приспособления для установки оправок и формирования заготовок подкрепляющих втулок. Показан вариант раскроенной заготовки из полуфабриката стеклопластика ВПС-32К10.

Спроектирован типовой технологический процесс установки композитных втулок (из дисперсно армированных и длинноволокнистых ПКМ) с уточнением подготовительных и заключительных этапов. Исходя из требований и выбранных основных и вспомогательных материалов, а также эластичных формующих элементов, назначены основные параметры технологического процесса. Показаны возможные пути оптимизации процесса с увеличением доли автоматизации, обуславливающие приспособленность метода к применению, как в условиях производства, авиаремонтных заводов, так и в полевых условиях или условиях строевых частей.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ УСТАНОВКИ ПОДКРЕПЛЯЮЩЕЙ ВТУЛКИ ТЕРМОКОМПРЕССИОННЫМ МЕТОДОМ

Несущая способность детали или агрегата с отверстием под крепеж и механического крепежного соединения зависит от напряженно-деформированного состояния (НДС) и сопутствующей ему концентрации напряжений в зоне крепежа. в общем случае на нее влияет комплекс эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов [1, 79 - 80]. Общее рассмотрение эксплуатационных факторов, влияющих на прочность соединений, показывает, что на стадии проектирования часть из них известна, а другая часть возникает в процессе реализации и отработки спроектированной конструкции. В связи с этим необходимо посредством конструктивно-технологических мероприятий организовать НДС в зоне крепежных точек таким образом, чтобы получить повышение несущей способности.

Оценено влияние распределение механических напряжений установленные в отверстия термокомпрессионным методом стеклопластиковые втулки. Показано сравнение теоретического решения, результаты компьютерного моделирования (методом конечных элементов), результаты испытаний конструктивно-подобных образцов, содержащих отверстия данных типов и установленные в них втулки.

5.1 Анализ напряженно-деформированного состояния в зоне отверстия и влияние на него подкрепляющего элемента

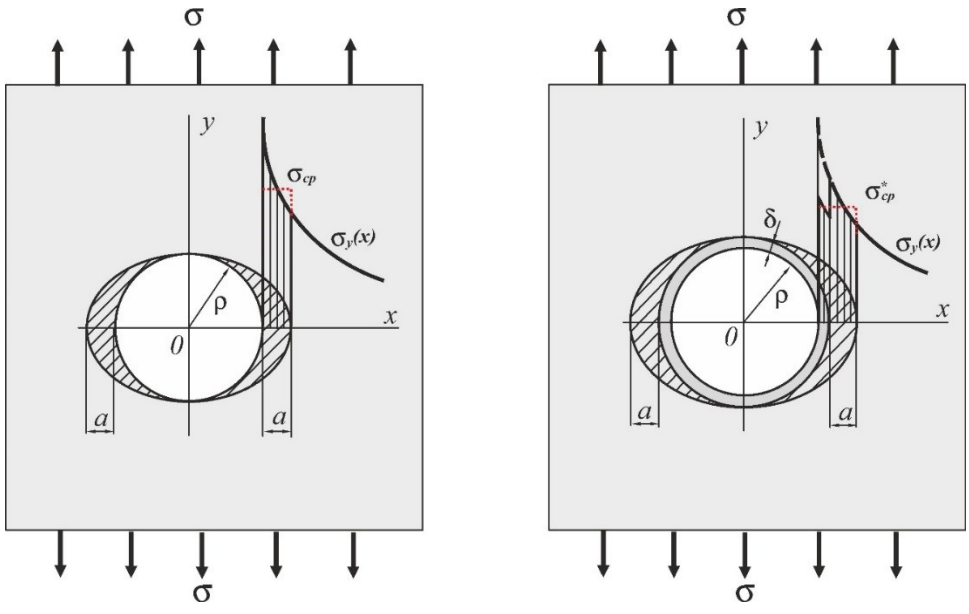
Вместо начальной формы отверстия в расчетах используют новую, фиктивную форму его контура, вычисленную с учетом деформирования [81 - 82] или образованную в результате предразрушения: в виде образования трещин, исходящих с поверхности отверстия [83]; в виде «затупления» отверстия до

некоторого радиуса [84], характерного для данного материала, либо в виде затупления по схеме [85 - 87].

Будем считать, что предразрушение имеет вдоль направления растяжения характерную протяженность и приводит к выходу из строя части материала, что эквивалентно росту радиуса, т. е. «затуплению» отверстия. Эффективный коэффициент концентрации, характеризующий снижение прочности вследствие наличия отверстия напряжений для круговых отверстий, определяется по формуле

$$K_\sigma = \frac{\sigma_в}{\sigma_0}$$

где σ_0 - статическая прочность образца с отверстием в расчете на нетто-сечение, $\sigma_в$ — прочность гладкого образца.



а) б)

Рисунок 5.1 – Модель нагружения плоской панели

а - без втулки; б – с втулкой

5.1.1 Нагружение пластины с отверстием без втулки

Рассмотрим нагружение пластины толщиной t с отверстием радиусом ρ (рисунок 5.1а), около которого в некоторый момент образуются трещины малой длины a.

Согласно энергетической теории разрушения Гриффитса, трещина начинает распространяться в элементе при такой нагрузке, при которой потенциальная энергия элемента Π не увеличивается [85 - 86], т.е.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a} = 0 \ ,$$

где Π — потенциальная энергия элемента с трещиной при нагружении.

Развитие трещин в материале с удельной работой разрушения γ требует затраты поверхностной энергии

$$G = 2\gamma \cdot a \cdot t$$

При нагружении упругая энергия накапливается в основном около отверстия. Положим для простоты, что зона интенсивного накопления энергии (на рис. 1 заштрихована) имеет контур эллипса с полуосями $\rho + a$, ρ. Площадь этой зоны равна

$$S = S_{\text{элл.}} - S_{\text{кр.}} = \pi\rho(\rho + a) - \pi\rho^2 = \pi\rho(\rho + a - \rho) = \pi\rho a.$$

При образовании трещин указанная зона разгружается, часть энергии расходуется на разрушение, а часть энергии, пропорциональная объему перегруженной области, переходит в тепло, энергию волн и т.п. Напряжения в каждой точке вокруг отверстия пропорциональны приложенному напряжению σ,

поэтому среднее напряжение в заштрихованной зоне можно определить путем интегрирования

$$\sigma_{ср} = \frac{1}{a}\int_{\rho}^{\rho+a} \sigma_y(x)dx$$

Очевидно, что среднее напряжение $\sigma_{ср}$ в зоне предразрушения так же пропорционально величине приложенного напряжения $\sigma_{ср} \sim \sigma$, пусть

$$\sigma_{ср} = \alpha\sigma .$$

Потенциальная энергия деформации, накопленная в зоне предразрушения объемом $V = S_{эллипс}t = \pi\rho at$ определяется через средние напряжения

$$U(a) = \frac{1}{2E}\sigma_{ср}^2 V = \frac{\sigma_{ср}^2}{2E}\pi\rho at$$

Потери энергии, пропорциональные объему нагруженной области

$$W = \beta\pi\rho at$$

где β - удельная потеря энергии в разгружаемом при образовании трещин объеме, пропорциональная среднему оставшемуся напряжению.

Следовательно, энергетическое условие образования трещин можно записать в виде

$$\frac{(\alpha\sigma)^2}{2E}\pi\rho at = 2\gamma at + \beta\pi\rho at ,$$

$$\pi\rho(\alpha\sigma)^2 = 2E(2\gamma + \beta\pi\rho),$$

$$\sigma^2 = \frac{4E\gamma}{\alpha^2\pi\rho} + \frac{2E\beta}{\alpha^2} = \frac{2E}{\alpha^2}\left(\frac{2\gamma}{\pi\rho} + \beta\right).$$

Тогда эффективный коэффициент концентрации

$$K_\sigma = \frac{\sigma_в}{\sigma} = \frac{\sigma_в}{\sqrt{\frac{2E}{\alpha^2}\left(\frac{2\gamma}{\pi\rho} + \beta\right)}}$$

или $$K_\sigma = \frac{1}{\sqrt{\frac{4E\gamma}{(\alpha\sigma_в)^2\pi\rho} + \frac{2E\beta}{(\alpha\sigma_в)^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{C_\gamma}{\rho} + C_\beta}} \quad (1)$$

$$C_\gamma = \frac{4E\gamma}{\pi(\alpha\sigma_в)^2}\ ; \qquad C_\beta = \frac{2E\beta}{(\alpha\sigma_в)^2}.$$

С учетом основного соотношения механики разрушения

$$K_{IC} = \sqrt{2\gamma E}$$

получаем связь коэффициента концентрации напряжений с коэффициентом интенсивности напряжений в виде формулы (1).

5.1.2 Нагружение пластины с отверстием с установленной втулкой

Модель отверстия с установленной втулкой с толщиной стенки δ представлена на рисунке 5.1б.

Рассчитаем эффективный коэффициент концентрации напряжений для отверстия с установленной стеклопластиковой втулкой на основе изложенного выше подхода. Для этого случая:

- энергия продвижения трещины такая же, как и для ранее рассмотренной схемы отверстия без втулки

$$G^* = 2\gamma \cdot a \cdot t;$$

- потери энергии при продвижении трещины:

$$W^* = \beta\pi(\rho+\delta)at;$$

- потенциальная энергия деформации:

$$U^*(a) = \frac{1}{2E}(\sigma_{cp}^*)^2 V = \frac{(\sigma_{cp}^*)^2}{2E}\pi(\rho+\delta)at$$

Уравнение баланса энергии следующее:

$$\frac{(\alpha^*\sigma^*)^2}{2E^*}\pi(\rho+\delta)at = 2\gamma at + \beta\pi(\rho+\delta)at,$$

откуда следует

$$(\sigma^*)^2 = \frac{4E\gamma}{(\alpha^*)^2\pi(\rho+\delta)} + \frac{2E\beta}{(\alpha^*)^2} = \frac{2E}{(\alpha^*)^2}\left(\frac{2\gamma}{\pi(\rho+\delta)} + \beta\right);$$

$$K_\sigma^* = \frac{\sigma_в}{\sigma^*} = \frac{\sigma_в}{\sqrt{\frac{2E}{(\alpha^*)^2}\left[\frac{2\gamma}{\pi(\rho+\delta)} + \beta\right]}}$$

Таким образом, различие в степени концентрации напряжений в зоне отверстия с подкреплением и без него определяется «затуплением» отверстия за счет втулки (т.е. увеличением радиуса зоны предразрушения с ρ до $\rho+\delta$) и снижением уровня средних напряжений в зоне предразрушения с $\sigma_{ср}$ до $\sigma_{ср}^*$.

Эти два фактора, сглаживающих локальное возмущение поля напряжений в области крепежного отверстия и обеспечивающие повышенную прочность

соединения с подкрепляющей втулкой, являются показателями эффективности применения подкрепляющих элементов.

5.1.3 Количественное сравнение вариантов без втулки и с втулкой

Для количественной оценки преимуществ конструкции с втулкой сравним величины эффективных коэффициентов концентрации напряжений для типового соединения и соединения с установленной втулкой.

$$\frac{K_\sigma}{K_\sigma^*}=\frac{\dfrac{\sigma_в}{\sqrt{\dfrac{2E}{\alpha^2}\left(\dfrac{2\gamma}{\pi\rho}+\beta\right)}}}{\dfrac{\sigma_в}{\sqrt{\dfrac{2E}{(\alpha^*)^2}\left[\dfrac{2\gamma}{\pi(\rho+\delta)}+\beta\right]}}}=\sqrt{\frac{\alpha^2}{(\alpha^*)^2}\cdot\frac{\dfrac{2\gamma}{\pi(\rho+\delta)}+\beta}{\dfrac{2\gamma}{\pi\rho}+\beta}}$$

В первом приближении будем учитывать только один из двух вышеуказанных факторов – изменение величины средних напряжений в зоне предразрушения, определяемой в модели параметрами α и α^*. Принимая во внимание существенную неопределенность параметра β (коэффициент потерь механической энергии при разрушении) полагаем, что $\rho+\delta\approx\rho$. Тогда

$$\frac{K_\sigma}{K_\sigma^*}\approx\frac{\alpha}{\alpha^*}.$$

Рассматривая с позиций механики разрушения втулку как «стоппер» трещин вследствие наличия области с низкомодульным материалом (втулка) и области высокомодульного материала (углепластиковая панель) можно считать

соотношение средних напряжений для типового соединения и соединения с установленной втулкой равным соотношению напряжений в панели и напряжений в панели со стеклопластиковым стоппером, которое вычисляется по правилу смеси через модули упругости таким образом:

$$\frac{\sigma_{ср}}{\sigma^{*}_{ср}} = \frac{E_{панел}}{E^{*}};$$

где E^{*} - модуль упругости для комбинированного материала в зоне отверстия, состоящего из области стеклопластика размером δ и области материала панели (углепластика) размером а (рисунок 5.1б), определяемый по правилу смеси:

$$E^{*} = E_{панел}\left(1 + \frac{E_{вт}}{E_{панел}}\frac{\delta}{a}\right)\frac{a}{a+\delta}$$, где $E_{вт}$ – модуль упругости материала втулки.

Можно считать, что

$$\sigma^{*}_{ср} = \sigma_{ср}\left(1 + \frac{E_{вт}}{E_{панел}}\frac{\delta}{a}\right)\frac{a}{a+\delta}$$

и

$$\frac{K_{\sigma}}{K^{*}_{\sigma}} \approx \frac{\alpha}{\alpha^{*}} = \frac{\sigma_{ср}}{\sigma^{*}_{ср}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{E_{вт}}{E_{панел}}\frac{\delta}{a}\right)\frac{a}{a+\delta}}.$$

Размер зоны предразрушения a рассчитывают методами механики разрушения по известным характеристикам прочности и трещиностойкости углепластиковой панели. Согласно механике разрушения композиционных материалов [87 - 88] размер зоны предразрушения устанавливает связь между пределом статической прочности материала $\sigma_{в}$ и критическим значением коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} в виде:

$$K_{IC} = \sigma_в \sqrt{\pi a}$$

Откуда следует, что

$$a = \frac{K_{IC}^2}{\pi \sigma_в^2}$$

Для рассматриваемого углепластика с характеристиками K_{IC}= 89,2 МПа·м$^{1/2}$ и $\sigma_в$=1720 МПа получим размер a = 8,56·10^{-4} м ≈ 0,86 мм

Тогда соотношение коэффициентов концентрации напряжений для соединений без втулки и с втулкой:

$$\frac{K_\sigma}{K_\sigma^*} \approx \left(1 + \frac{E_{вт}}{E_{панел}} \frac{\delta}{a}\right) \frac{a}{a+\delta} = \left(1 + \frac{42000}{121000} \frac{0,5}{0,86}\right) \frac{0,86}{1,36} = 1,27$$

Таким образом, расчеты по модели «затупления» отверстия показывают возможность снижения концентрации напряжений в зоне крепежного отверстия за счет установки стеклопластиковой втулки на 27 %.

5.2 Оценка эффективности с помощью компьютерного моделирования

Для оценки эффективности предлагаемой технологии методами конечно-элементного (КЭ) моделирования в среде MSC.Nastran выполнено сравнение напряженно-деформированного состояния в моделях углепластиковых панелей, содержащих свободное отверстие под крепеж и подкрепленное стеклопластиковой втулкой. В 3D-моделях применялись трехмерные Solid-элементы - тетраэдры с 4 и 8 узлами.

КЭМ построена для цилиндрического отверстия (рисунок 5.2) и отверстия с конической зенковкой под болт с потайной головкой (рисунок 5.3).

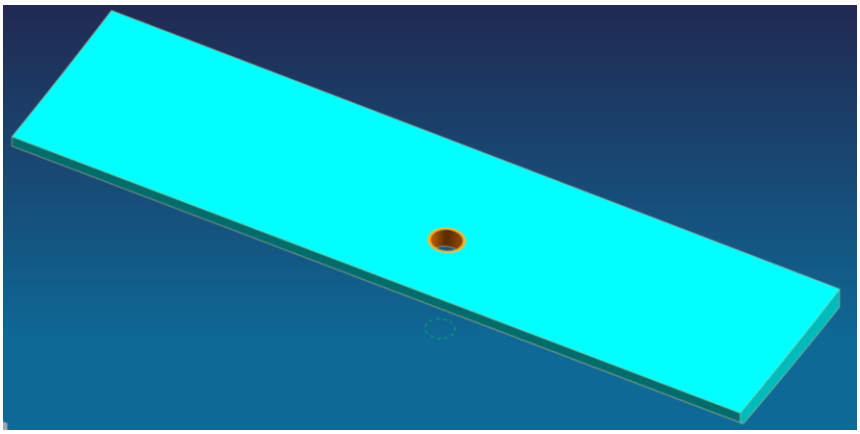


Рисунок 5.2 – Твердотельная модель монолитной панели из углепластика с установленной в цилиндрическое отверстие стеклопластиковой втулкой

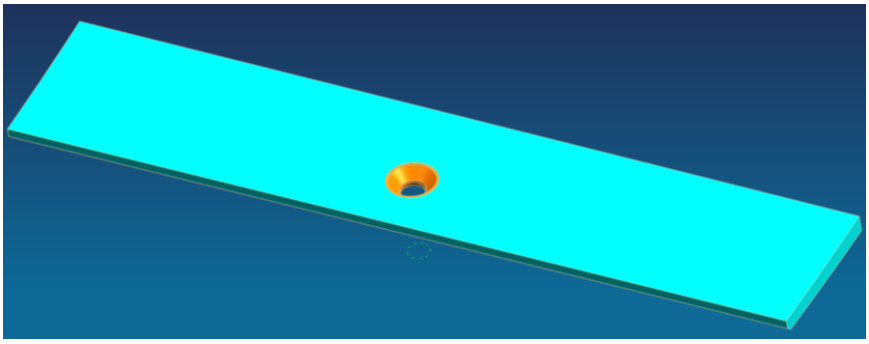


Рисунок 5.3 – Твердотельная модель монолитной панели из углепластика с установленной отверстие под потайной крепеж стеклопластиковой втулкой

В таблице 5.1 приведены основные механические характеристики материалов, из которых состоит объект исследования, которые были учтены при построении твердотельной модели.

Таблица 5.1 – Основные механические характеристики применяемых в твердотельной модели материалов (характеристики сняты при нормальной температуре)

Материал	**КМКУ (ВКУ-30) (углепластик – панель)**	**ВПС-32К10 (стеклопластик – втулка)**
Показатель	Значение	
σ_1+, МПа	1720	1500
σ_1-, МПа	1000	900
σ_2+, МПа	71	75
σ_2-, МПа	-	210
E_1^+, ГПа	121	42
E_1^-, ГПа	110	30
μ	0,33	0,31
τ_{12}, МПа	75	-
τ_{13}, МПа	105	80
$G_{12}=G_{13}$, ГПа	30	4
E_2^+, ГПа	9,2	11
E_2^-, ГПа	8,2	-
K_{IC}, МПа·м$^{1/2}$ (кгс/мм$^{3/2}$)	89,2 (282)	-
Толщина монослоя* t, мм	0,14	0,2

*Теоретическая толщина монослоя

В модели учтены схема армирования панели – $[0^0/0^0/\pm45^0/90^0/\pm45^{0/}/0^0/0^0]_{4S}$, типовая для регулярной зоны конструкционного элемента планера летательного аппарата и схема армирования стеклопластиковой втулки – окружного направления («спираль»).

Результат конечно-элементного моделирования визуализированно представлен на рисунках 5.4 – 5.5.

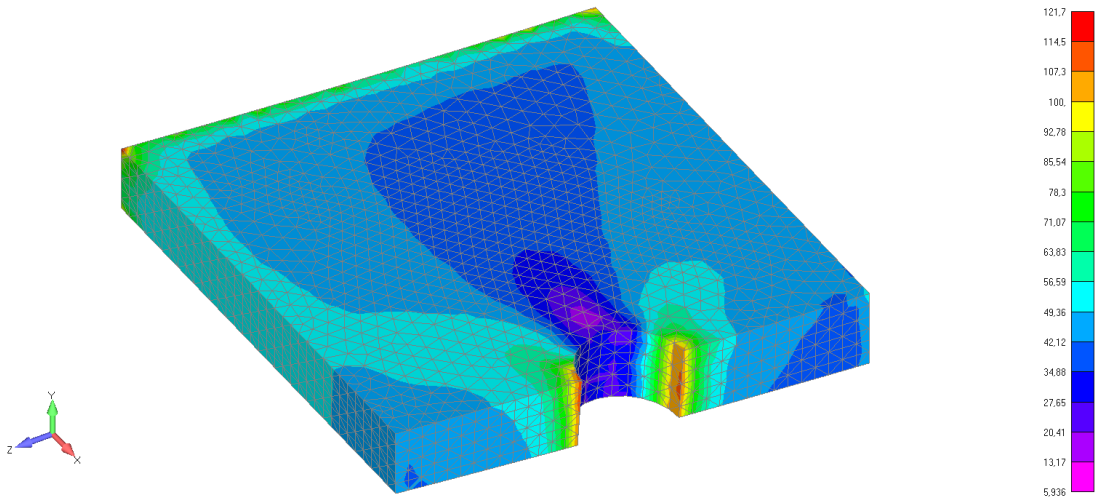


Рисунок 5.4 – Схема распределения механических напряжений и их эквивалентное значение (Па) для углепластикового образца без втулки

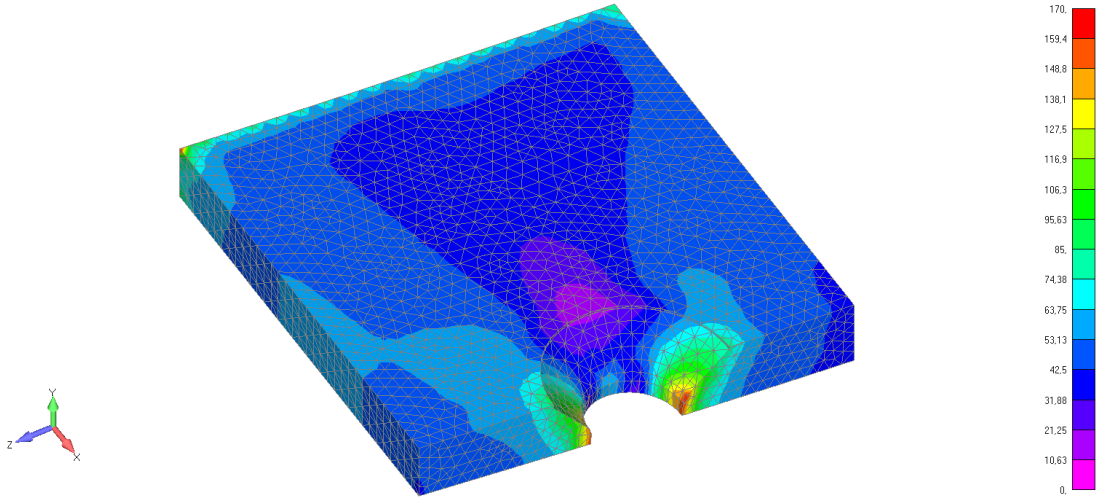


Рисунок 5.5 – Схема распределения механических напряжений и их эквивалентное значение (Па) для углепластикового образца с отверстием под потайную головку болта без втулки

Результаты моделирования, представленные на рисунках 5.4 – 5.5, даны для случая нагружения растягивающим усилием величиной 5000 Н. Конструктивные элементы, приведенные на рисунках 5.4 – 5.5, имеют одинаковые диаметры (в реальности выполненные с одинаковым классом точности), второе отверстие имеет конусную часть (прозенковано) в качестве посадочного для болта с потайной головкой (угол зенкования 90 º). Расчет показывает, что при переходе от цилиндрического отверстия к отверстию с конической прозенковкой, уровень

максимальных действующих механических напряжений в пластине с заданными схемами армирования снижается на величину порядка 28 - 23 %, что вполне хорошо согласуется со справочными данными. Например, теоретический расчет, учитывающий только уменьшение рабочего сечения дает:

$$К = 1 - \frac{\sigma_{в1}}{\sigma_{в2}} = 1 - \frac{\frac{P}{S-24.6}}{\frac{P}{S-33.9}} = 1 - \frac{S-33.9}{S-24.6} \approx 1 - 0.8740 = 0.1260 = 12{,}6\ \%$$

где P – прикладываемое усилие, S – рабочее сечение без учета отверстий (брутто).

Примечание:

Часто при расчетах используется параметр эффективный диаметр отверстия, учитывающий зенковку отверстия под потайную головку крепежного элемента. Эффективный диаметр – диаметр эквивалентного отверстия без фаски, имеющего равную реальному отверстию площадь осевого сечения:

$$D = \frac{d_ц \cdot S + (d_Г - d_ц) \cdot \frac{h_Г}{2}}{S}.$$

На рисунках 5.6 – 5.7 приведены результаты моделирования случаев нагружения тех же конструктивных элементов, но содержащих стеклопластиковые втулки. В моделях не учитывается клеевая прослойка между втулкой и пластиной, дано допущение на создаваемый втулкой натяг в отверстии (втулка, установленная термокомпрессионным методом должна создавать напряжения сжатия в зоне, примыкающей к кромкам отверстиям за счет фиксации своей формы в процессе формования по месту под давлением эластичного формующего элемента (ЭФЭ)).

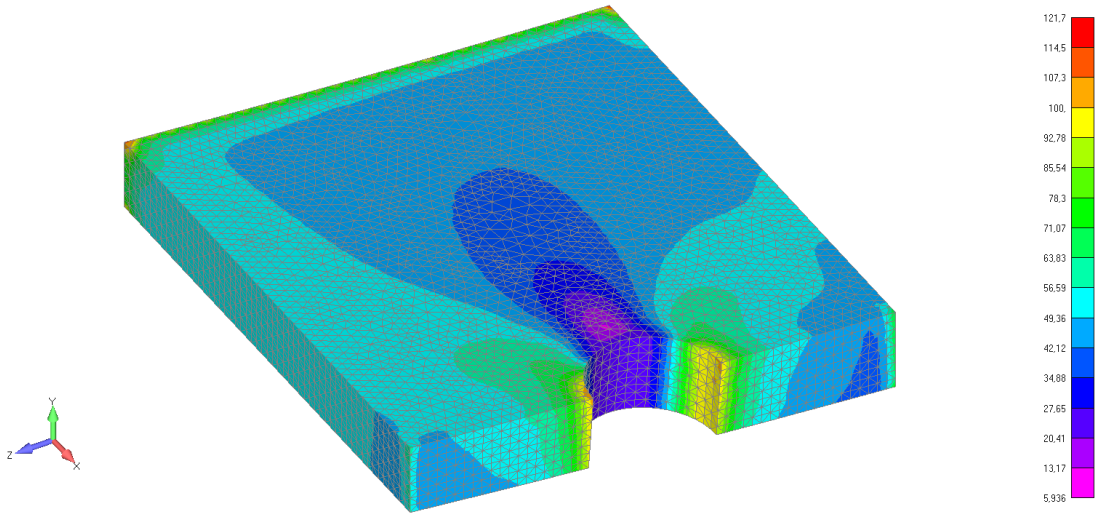


Рисунок 5.6 - Схема распределения механических напряжений и их эквивалентное значение (Па) для углепластикового образца с втулкой. Сама стеклопластиковая втулка не показана для удобства считывания картины распределения напряжений в углепластике

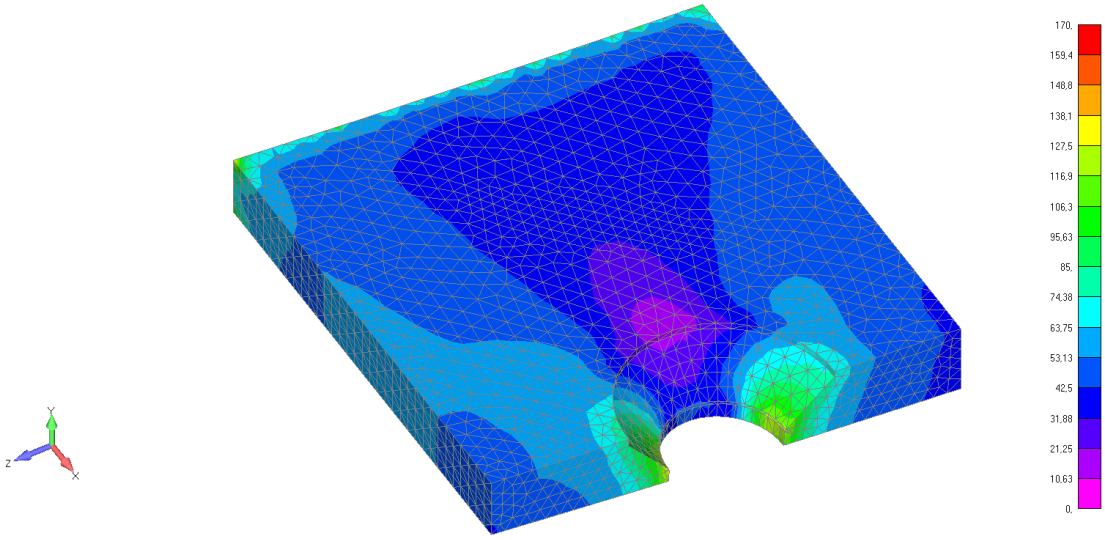


Рисунок 5.7 - Схема распределения механических напряжений и их эквивалентное значение (Па) для углепластикового образца с втулкой, установленной в отверстие с конической прозенковкой. Сама стеклопластиковая втулка не показана для удобства считывания картины распределения напряжений в углепластике

На рисунке 5.8 приведен результат моделирования поведения при испытании образца с цилиндрическим отверстием, имеющего два поперечных «условных» надреза а = 0,75 мм, на рисунке 5.9 – аналогично, но с установленной стеклопластиковой втулкой.

Примечание. Надрез назван «условным» по причине того, что имеется некоторое допущение: данный дефект смоделирован «рызрывом» нескольких связей между элементами конечно-элементной сетки в пределах указанной длины a.

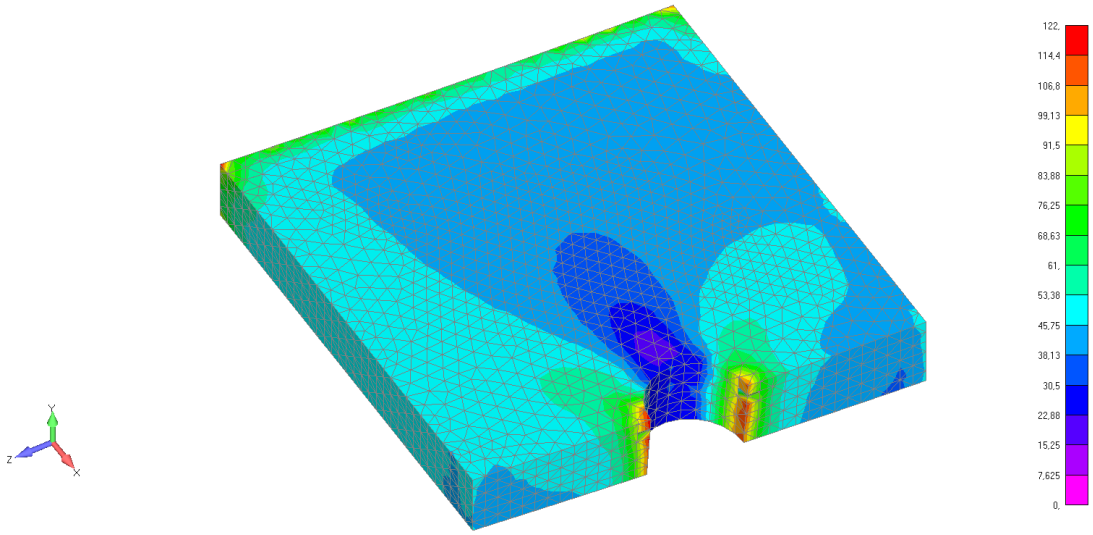


Рисунок 5.8 - Схема распределения механических напряжений и их эквивалентное значение (Па) для углепластикового образца, имеющего два поперечных надреза

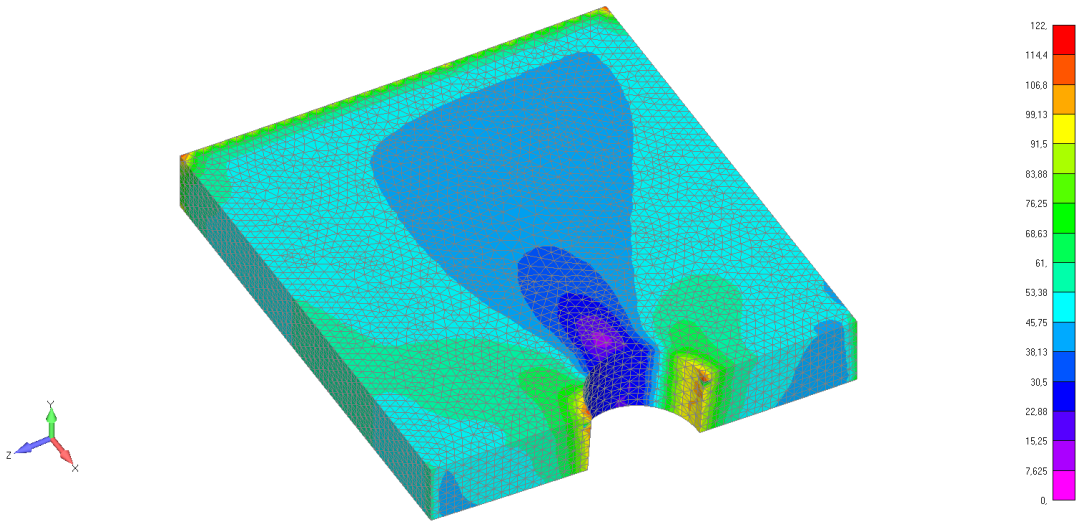


Рисунок 5.9 - Схема распределения механических напряжений и их эквивалентное значение (Па) для углепластикового образца, имеющего два поперечных надреза. Установлена стеклопластиковая втулка аналогично рисунку 5.6

На рисунках 5.10 – 5.11 приведены схемы распределения механических напряжений в зонах отверстий с конической прозенковкой и поперечными надрезами, выполненными на участке сопряжения цилиндрической и конической частей. Условия приложения нагрузки аналогичны. Установленные стеклопластиковые втулки не показаны для удобства считывания значений напряжений углепластиковой панели.

Примечание. Допущение по «условному» надрезу аналогичное - данный дефект смоделирован «разрывом» нескольких связей между элементами конечно-элементной сетки в пределах указанной длины а.

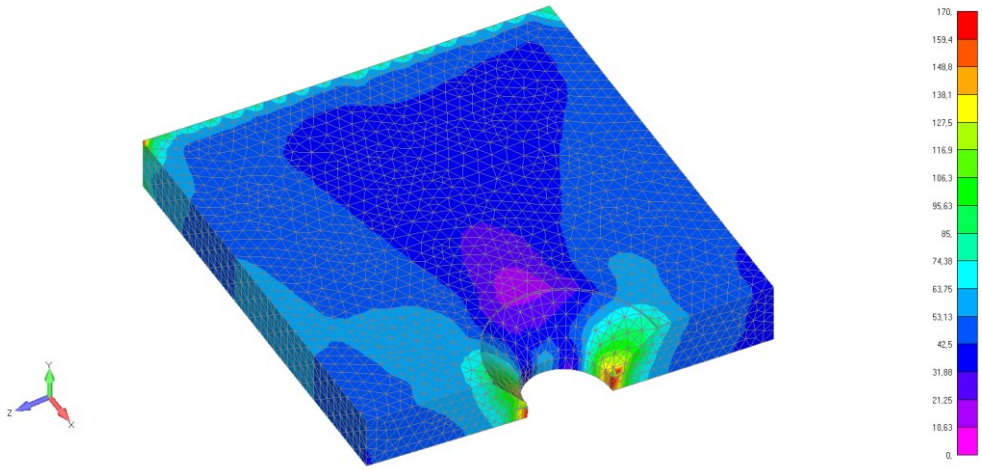


Рисунок 5.10 - Схема распределения механических напряжений и их эквивалентное значение (Па) для углепластикового образца с прозенкованным отверстием, имеющего два поперечных надреза

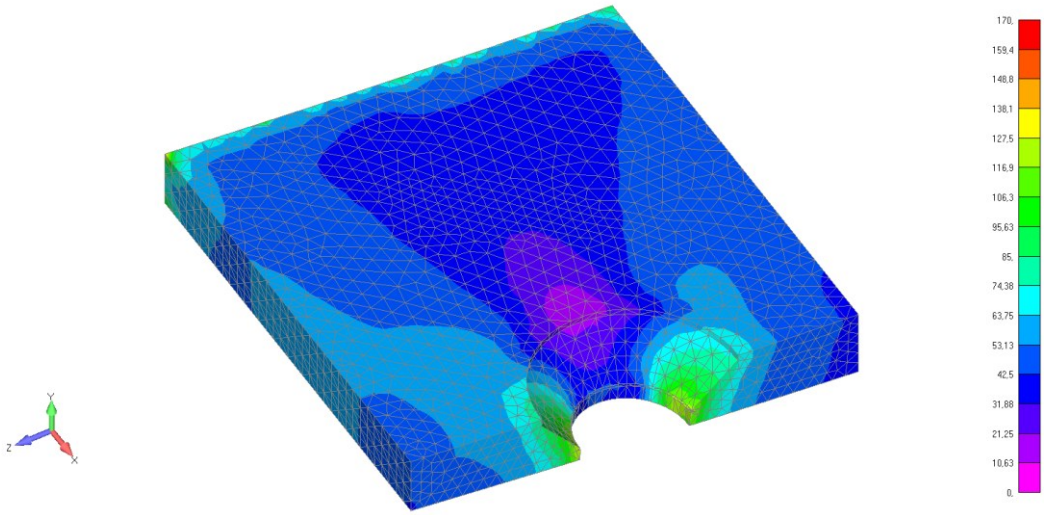
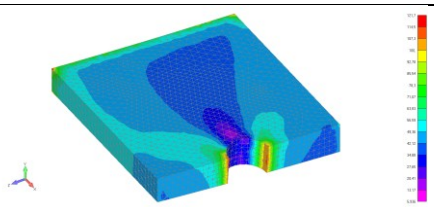
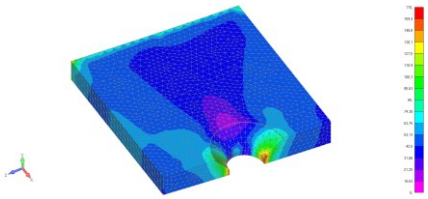
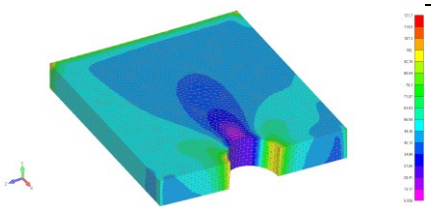
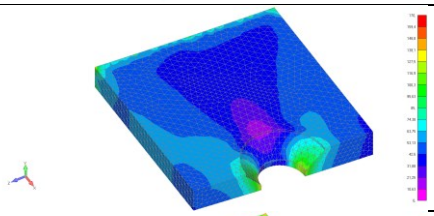
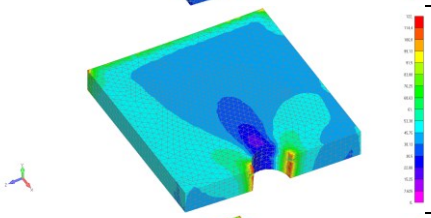
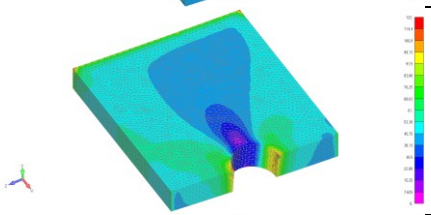
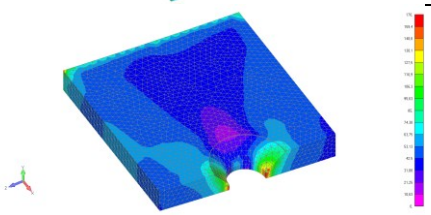
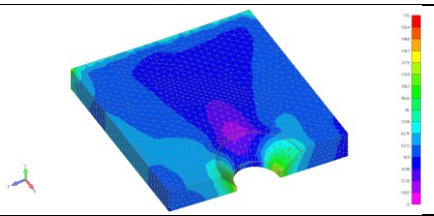


Рисунок 5.11 - Схема распределения механических напряжений и их эквивалентное значение (Па) для углепластикового образца с прозенкованным отверстием, имеющего два поперечных надреза, с установленной стеклопластиковой втулкой

Результаты конечно-элементного моделирования представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты конечно-элементного моделирования конструктивно подобного элемента монолитного эпоксиуглепластика

КЭМ	Исполнение	Уровень экв. напряжений, Па	Относительная стат. прочность, %
	Цилиндрическое отверстие, без втулки	114,5 – 121,7	100
	Прозенкованное отверстие, без втулки	159,4 - 168	65 - 76
	Цилиндрическое отверстие, втулка	100	114 - 122
	Прозенкованное отверстие, втулка	106,3 – 116,9	101 - 110
	Цилиндрическое отверстие, надрез, без втулки	122	93,4
	Цилиндрическое отверстие, надрез, втулка	91,5 – 99,13	116 – 122,5
	Прозенкованное отверстие, надрез, без втулки	170	56
	Прозенкованное отверстие, надрез, втулка	106,3 – 116,9	101 - 110

Таким образом, сопоставляя результаты моделирования приложения нагрузок к образцам с цилиндрическим отверстием и прозенкованным отверстием без втулки и с установленными втулками соответственно, а также с нанесенным условным симметричным надрезом, можно констатировать:

- картина распределения напряжений для пластин без втулок и с втулками качественно схожая;

- для цилиндрических и зенкованных отверстий, отверстий с надрезами меняется характер распределения напряжений из-за появления концентратора в виде перехода с цилиндрической на конусную часть и собственно надреза;

- для пластин с цилиндрическими отверстиями уровень максимальных механических напряжений снижается на 12,7 – 17,8 % для отверстий с установленными втулками;

- для пластин с зенкованными отверстиями уровень максимальных напряжений снижается на 20,0 – 26,7 % с установленными втулками;

- для пластин с нанесенным надрезом в цилиндрическом отверстии уровень максимальных механических напряжений снижается на 18,7 – 25 % для отверстий с установленными втулками;

- для пластин с нанесенным надрезом в зенкованных отверстиях уровень механических напряжений снижается на 31,2 – 37,4 % для отверстий с установленными втулками, причем для образцов с втулками наличие или отсутствие надрезов практически не влияет на уровень напряжений.

5.3 Оценка эффективности по результатам механических испытаний

Была изготовлена серия образцов из панели углепластика, по конструкции и схеме армирования соответствующая приведенным в подразделе 5.2 данным. С помощью приспособления и конических вкладышей под болты имитировалось нагружение на срез болта. Все болты номинальным диаметром 6 мм затягивались нормированным моментом 12 Н·м. Приспособление после сборки с образцом (рисунок 5.12) устанавливалось в захваты испытательной машины и нагружалось до разрушения образца.

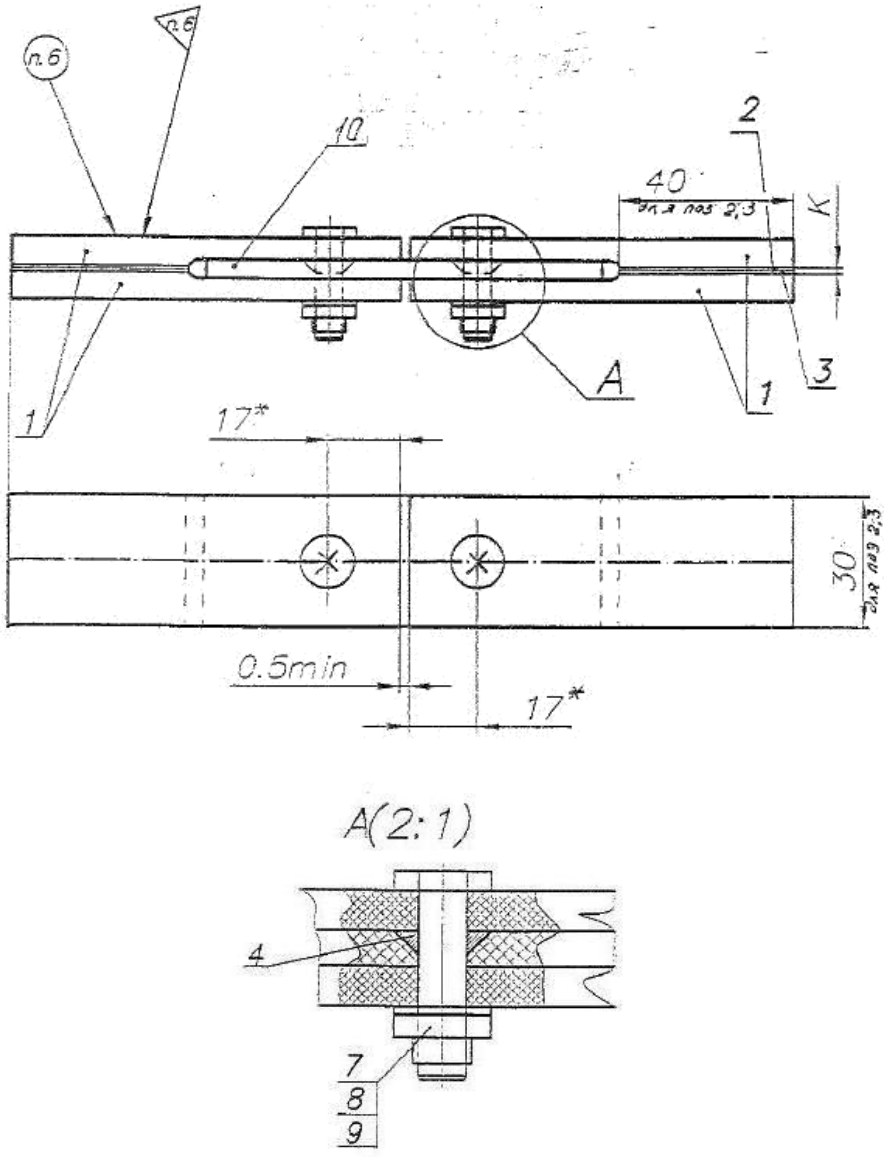


Рисунок 5.12 – Эскиз образца в сборе с приспособлением
1 – захваты, 2, 3 – компенсирующие прокладки; 4 – вкладыш; 7- болт; 8- гайка; 9 – шайба; 10 – испытуемый образец

Испытания на растяжение образцов производилось в разрывной машине «Instron 195» - 10 т.

Некоторые из результатов испытаний образцов различных исполнений (конструкций втулок, режимов термокомпрессионного формования и материалов ЭФЭ) приведены в таблице 5.3 в относительных величинах в сравнении с соответствующими результатами КЭ-моделирования.

Таблица 5.3. - Сравнение результатов КЭ-моделирования и механических испытаний

Образцы	**Результаты КЭ-моделирования**	**Результаты механических испытаний***
	Относительное значение прочности, расчет, %	**Относительное значение прочности, эксперимент, %**
Исходные образцы без втулок	100	100
Образцы с установленными втулками	120…126,7	115**

Примечания:

*Среднее значение по трем испытаниям, имитирующим нагружение композитной панели с болтовым соединением на срез.

** Использование в качестве расширяющихся оправок ЭФЭ на кремнийорганической основе.

Выводы по главе

Конструктивно-технологический прием подкрепления отверстий под крепеж с дефектами производственного и эксплуатационного происхождения с помощью установки композитных стеклопластиковых втулок представляется перспективным в связи с его высоким восстановительным эффектом для

соединений элементов высоконагруженных композитных конструкций, в частности авиационного назначения, для которых крайне важны показатели прочности и надежности. Проведенные компьютерное моделирование и экспериментальное исследование прочностных свойств моделей композитных соединений с различными вариантами технологических параметров установленных втулок указывают на возможность повышения несущей способности даже относительно неповрежденных образцов.

Эффективность применения предлагаемой технологии была оценена посредством:

1 Методов механики разрушения, где даны теоретические предпосылки для возможности повышения несущей способности образцов и повышения трещиностойкости точечных механических соединений;

2 Конечно-элементного анализа, с помощью которого проведена оценка распределения механических напряжений, в том числе, в образцах с установленными втулками;

3 Испытаний конструктивно подобных образцов при растяжении до разрушения.

Разные методы оценки эффективности показали хорошую сходимость результатов. Теоретический расчет по модели «затупления» отверстия показывает возможность снижения концентрации напряжений в зоне крепежного отверстия за счет установки стеклопластиковой втулки на 27 %. Расчет по МКЭ для аналогичной конструкции (с учетом схем армирования) дал результат снижения концентрации напряжений на 20 – 27 %. Конструктивно подобные образцы, в которых также учитывались схемы армирования углепластиковой детали и стеклопластиковой втулки, испытанные по схеме нагружения с болтовым соединением нормированной затяжки на срез, показали среднее значение увеличения несущей способности на 15 %.

ВЫВОДЫ

1. Приведены основные классификации дефектов и повреждений ПКМ, в т.ч. в связи с наличием отверстий под крепежные элементы, показано, что отверстия под крепеж и зоны вблизи них, являются потенциально дефектными в микромасштабе, уже в процессе образования отверстий, с возможной повышенной вероятностью возникновения и роста дефектов в процессе эксплуатации. Приведены известные подходы по решению этой проблемы и снижению отрицательного влияния указанных дефектов на несущую способность конструкций. Актуальность выработки эффективных решений дополнительно подтверждается большим количеством крепежных отверстий и элементов в современных и перспективных агрегатах из композитов в том числе высокоответственных в ресурсоограничивающих зонах, высокой трудоемкостью их получения с помощью механической обработки.

2. Впервые предложена модификация эпоксидных матриц и углепластиков на их основе стеаратом цинка для улучшения условий резания при формировании отверстий механической обработкой и снижения их дефектности. Установлена наиболее эффективная концентрация модификатора в количестве 0,1-0,3 %, масс., приводящая к снижению температуры резания в зависимости от толщины образцов матрицы на 50-60 % и типа режущего инструмента - на 60-70 % и шероховатости поверхности стенок отверстия - на 20-25 %.

В углепластике эффект модификации матрицы приводит по данным компьютерной рентгеновской томографии к снижению дефектности в виде структурной неоднородности материала вблизи отверстия на 65-70 %.

Определен состав модифицированного эпоксидного связующего, изучено методом капли его смачивающая способность полированных пластин графита, моделирующих поверхность углеродного волокна, определены реологические и термокинетические параметры его отверждения. Установлено отсутствие влияние модификатора на угол смачивания поверхности углеродных материалов, вязкость расплава связующего и условий его отверждения, что позволяет использовать

общепринятые технологии совмещения модифицированного связующего с углеродными волокнистыми наполнителями и формования изделий на их основе. Установлено отсутствие отрицательного влияния добавки на механические свойства в пределах эффективного диапазона модифцирования.

Методом ДМА установлено незначительное влияние модификатора на температуру стеклования отвержденных по стандартному режиму эпоксидных связующих. Снижение теплостойкости модифицированных матриц не превышало 8-10 %.

3. Впервые предложен способ повышения несущей способности конструкционных эпоксиуглепластиков путем установки в крепежных отверстиях стеклопластиковых втулок, выполняющих роль стопперов в процессе эксплуатации авиационных конструкций. Экспериментально определено увеличение несущей способности болтового соединения эпоксиуглепластика со стеклопластиковыми втулками на 15 %, которое подтверждается расчетно-аналитическим методом и компьютерным моделированием конструктивно подобных образцов эпоксиуглепластиков без установки крепежа в отверстиях с упрочненными втулками, где это значение составляет соответственно 27 % и 20-27 %.

Обозначены основные требования, предъявляемые к методу установки подкрепляющего элемента, и основные принципы его формирования. показано, что метод должен обеспечивать:

- нивелирование имеющихся геометрических отклонений исходного отверстия, появившихся вследствие, например, отклонений в ходе технологического процесса образования отверстий с помощью механической обработки или эксплуатационного ресурсного износа (увеличение диаметра отверстия, снижение его точности, отклонение от правильной формы, например, овализация);

- нивелирование имеющихся и зарождающихся микроповреждений, приобретенных в результате механической обработки, появившихся или развившихся в ходе эксплуатации изделия;

- нивелирование (снижение влияния на несущую способность) дефектов типа расслоения, возникающих вследствие установки крепежных элементов и снижение интенсивности их роста в процессе эксплуатации;

- создание оптимального НДС в зоне отверстий, в т.ч. в условиях работы крепежных соединений с металлическим крепежом.

Выбрана окружная схема армирования стеклопластиковых втулок, намоточная технология сборки исходной заготовки втулки и ее установки в отверстиях конструкционного эпоксиуглепластика.

Выбран состав эластичного формующего элемента и экспериментально отработаны условия термокомпрессионного уплотнения и отверждения связующего заготовки подкрепляющих стеклопластиковых втулок в отверстиях конструкционного углепластика. Температура, давление и длительность процесса формования составляли соответственно (180±5) °С, 0,6 МПа и (180+10) мин.

- Определен эффект подкрепления стеклопластиковыми втулками отверстий в конструкционных эпоксиуглепластиках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колганов И.М. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Ч.1: уч.пос. Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 148 с.

2. Степнов М.Н., Зинин А.В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций. М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 392 с.

3. Вишняков М.А., Вашуков Ю.А. Конструкторско-технологические методы обеспечения качества изделий машиностроения. Уч.пос. Изд. СГАУ – Самара, 2005. – с. 76 – 91

4. Семин М.И., Стреляев Д.В. Расчеты соединений элементов конструкций из композиционных материалов на прочность и долговечность. – М.: ЛАТМЭС, 1996. – 287 с.

5. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка, 1968. - 891 с.

6. Карпов Я.С., Кривенда С.П., Рябков В.И. Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов, Изд-во ХАИ, Харьков, - 1997. – с. 50 – 64.

7. Комаров Г.В. Соединение деталей из полимерных материалов: Учеб.пособие. – СПб.: Профессия, 2006

8. Комаров Г.В. Способы соединения деталей из пластических масс. М: Химия, 1979. -287 с.

9. Ушаков А.Е. Общая постановка и схема решения задачи обеспечения безопасности авиаконструкций из ПКМ с учетом их повреждаемости // Известия Самарского научного центра РАН, т. 14, № 4 (2), 2012. С. 339 – 347.

10. Ендогур А.И., Кравцов В.А.// Идеология проектирования авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов// Труды МАИ, № 8. 4 с.

11. Sun H.T., Chang F.T., Qing X.L. The Response of Composite Joints with Bolt-Clamping Loads – Part 1 Model Dewelopment. J Comp Mater 2002; 36; 69-92

12. Grews J.H. Bolt bearing fatigue of a graphite epoxy laminate. NASA Technical Memorandum, 1980;

13. Bau H., “Damage and Failure Mechanisms in Composite Bolted Joints”, Joining and Repair of Composite Structures, ASTM STP 1455, K.T. Kedward and H. Kim, Eds., ASTM Int., West Conshohocken, PA, 2004

14. Инженерная методика проектирования авиационных конструкций из КМ (обобщение 20-ти летнего практического опыта)/ Н. Новгород, 1997

15. Кривов Г.А., Матвиенко В.А., Тарасов Ю.М., Громашев А.Г. //Обеспечение соответствия новых технологий агрегатно-сборочного производства гражданских самолетов требованиям авиационных правил// Наука и технологии в промышленности - № 2, 2012. С. 60 – 67.

16. Насонов Ф.А., Бухаров С.В. Материаловедческие и технологические подходы к решению проблем микроповреждаемости углепластиков при образовании отверстий методами механической обработки // Новые технологии. Том 1. – Материалы XIV Всероссийской конференции, посвященной 70-летию ГРЦ им. академика В.П. Макеева. – М.: РАН, 2017. С. 110 – 118.

17. Swift T. Fail Safe Design Requirements and Features, Regulatory Requirements. AIAA/ICAS International Air and Space symposium and Exposition: the next 100 years, 14-17 July 2008, Dayton, Ohio, USA. P. 87 – 91.

18. Нестеренко Б.Г. Влияние поворота трещин на живучесть герметических фюзеляжей// Проблемы машиностроения и автоматизации, Изд-во НИАТ, Москва, № 2 – 2010, с. 88 – 96.

19. Кулемин А.В., Нестеренко Б.Г., Нестеренко Г.И., Ганс-Юрген Шмидт. Экспериментальное иследование поворота трещин//Проблемы машиностроения и надежности машин. -№ 6. -2006. -С. 90-96.

20. Pettit K.G., Wang J.J. and Toh C. Validated Feasibility study of Integrally Stiffened Metallic Fuselage Panels for Reducing, NASA/CR -2000-209342.

21. Zaal K. A Survey of Crack Path Stability Criteria and Their application to Crack Flapping Phenomena in Stiffened Structures, Report LR-681, TU Delft, Faculty of Aerospace Engineering, the Netherlands, September 1992.

22. Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов. Ю.А. Вашуков. /уч. пос. - Самара: Изд-во СГАУ, 2007. 65 с.

23. Вашуков Ю.А. Исследование напряженно-деформированного состояния соединения изделий из композиционных материалов, Известия Самарского научного центра РАН, т. 11, № 3 (2), 2009. С. 414 – 419.

24. Савин Г.Н., Тульчий В.И. Пластинки, подкрепленные составными кольцами и упругими накладками. Киев: Наукова думка, 1971. – 268 с.

25. Вашуков Ю.А. Определение деформированного состояния втулки, подкрепляющей отверстие в деталях из полимерных композиционных материалов// Проблемы машиностроения и автоматизации. 2004, № 2. С. 160 – 167.

26. Вашуков Ю.А., Пересыпкин В.П., Пересыпкин К.В., Никоноров Н.Н. Конечно-элементное моделирование напряженного состояния при подкреплении отверстия в элементах конструкций из полимерных композиционных материалов// Известия Самарского научного центра РАН, 2005, Т.7, № 2. С. 437 - 441.

27. Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов/ Уч. пос. / Ю.А. Вашуков. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 68 с.

28. А.С. 1608992. СССР МКИ В23К 20/08. Способ плакирования отверстий в листовых заготовках / Вашуков Ю.А., Барвинок В.А., Ломовской О.В., Богданович В.И. - № 4686506; Заяв. 3.05.89; Опубл. 23.11.90. Бюл. № 43

29. Каширский Д.А. Моделирование процесса постановки подкрепляющих элементов в отверстия конструкций из композиционных материалов с использованием программного комплекса DEFORM, // Тезисы докладов XX Научно-технической Конференции молодых ученых и специалистов, Королёв, 2014, с. 360 – 361

30. Подоляк М.П., Сажин А.Н. К вопросу о перспективных соединениях авиационных кострукций из полимерных композиционных материалов // Научный вестник МТГУ ГА, № 130 – 2008, с.172 – 179

31. Сажин Н.А., Соловьев Д.В., Климович А.В., Алесковский С.Л., Сажин А.Н. Заклепка и способ получения неразъемного заклепочного соединения. Патент на изобретение RUS 2261374 07.04.2003

32. Дементьева Л.А., Куцевич К.Е., Лукина Н.Ф, Петрова А.П. Использование клеевых связующих для получения полимерных композиционных материалов// Новости материаловедения. Наука и техника, № 2 (20) – 2016. С. 3 – 10.

33. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Технология изготовления ПКМ способом пропитки пленочным связующим//Клеи. Герметики. Технологии. 2011. № 6. С. 25-29.

34. Насонов Ф.А. Исследование влияния модифицирования матриц эпоксиуглепластиков на повреждаемость при образовании отверстий методами механической обработки // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; МАИ, 2017, С. 401 – 402.

35. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Мельников Д.А., Беседнов К.Л., Павлюк Б.Ф. Исследование свойств отвержденных клеевых связующих // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2017. № 10. Ст.06 URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения 01.02.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-6-6.

36. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. Клеящие материалы, рекомендуемые для применения в изделиях авиационной техники // Клеи. Герметики. Технологии. № 12 – 2015. С. 28 – 30.

37. Кириенко Т.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Петрова А.П. Исследование реологических свойств клеевых связующих//Клеи. Герметики. Технологии. 2016. №2. С. 6-8.

38. Петрова А. П., Дементьева Л. А., Лукина Н. Ф., Аниховская Л. И. Пленочные конструкционные клеи//Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 10. С. 7-12.

39. Kirienko T.A., Lukina N.F., Kutsevich K.E., Petrova A.P. A study of the rheological properties of adhesive binders//Polymer Science. D. 2016. Vol. 9. No. 3. P. 295-297.

40. Коротков С.Н., Жовнер Б.А. Исследование методом ДСК антиадгезионных добавок на время отверждения эпоксидных связующих в процессе пултрузии // Пластические массы, 1991. № 5. С. 46.

41. Носов К.С., Лапшина Е.М. Влияние технологической смазки на реологические и прочностные свойства полимер-минеральных материалов, полученных методом пластформования // Труды ПОЛИКОТРИБ-2015, Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси. Гомель, 2015. С. 39.

42. Насонов Ф.А., Алексашин В.М., Мельников Д.А., Бухаров С.В. Исследование влияния модифицирования эпоксидной матрицы и углепластика на ее основе стеаратом цинка на основные технологические свойства композиции // Вопросы материаловедения. 2018. № 3. С. 146 – 157

43. Гадеев А.С., Колтаев Н.В., Султанов А.И., Зарипов Т.Ф., Глазырин А.Б., Басыров А.А. Модифицирующие добавки для полимерных композиций на основе полиэтилена // Наука и образование сегодня, 2016. № 9. С. 5-9.

44. Марков В.А., Кандырин Л.Б., Марков А.В. Влияние технологических добавок на электрические характеристики полиэтиленовых композитов с техническим углеродом // Вестник МИТХТ, 2013. Т.8 № 6. С. 103–106.

45. Нифталиев С.И., Лыгина Л.В., Перегудов Ю.С., Прокофьева Л.А. Исследование реологических свойств композиций на основе ПВХ // Вестник ВГУИТ, 2014. № 2. С. 132–134.

46. Кириллов А.Г., Латышев М.В., Ратников А.С. Повышение износостойкости цилиндра автомобильного двигателя при использовании трибологических составов // Вестник ТТУ им. М.С. Осими, 2011. № 3. Т. 3. С.43–47.

47. Насонов Ф.А., Алексашин В.М., Мельников Д.А., Бухаров С.В. Исследование модифицирования стеаратом цинка эпоксидной матрицы и углепластика на ее основе // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 9. С. 24 – 31.

48. Антюфеева Н.В. Журавлева П.Л., Алексашин В.М., Куцевич К.Е. Влияние степени отверждения связующего на физико-механические свойства углепластика и микроструктуру межфазного слоя углеродное волокно/матрица // Клеи. Герметики. Технологии, 2014. № 12. С.26–30.

49. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. С. 6 – 32.

50. Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / Под ред. Е.Б. Тростянской. - М.: Химия, 1974. С. 81 – 86.

51. Мийченко И.П. Технология полуфабрикатов полимерных материалов. – СПб.: Научные основы и технологии, 2012. С. 120 – 132

52. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – СПб.: научные основы и технологии, 2008. С. 124 – 154

53. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов// Труды ВИАМ. № 8 – 2016. С. 7 – 15.

54. Петрова А.П., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Чурсова Л.В. Клеевые связующие для полимерных композиционных материалов на угле- и стеклонаполнителях// Труды ВИАМ. № 9 – 2015

55. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Петрова А.П. Использование клеевых связующих для получения полимерных композиционных материалов// Новости материаловедения. Наука и техника, № 2 – 2016

56. Куцевич К.Е. Клеевые препреги и углекомпозиты на их основе: автореф. дис. канд техн. наук. ВИАМ, Москва, 2014. 22 с.

57. Литвинов Б.В, Токсанбаев М.С., Деев И.С., Кобец Л.П., Рябовол Д.Ю, Нелюб В.А.. Кинетика отверждения эпоксидных связующих и микроструктура полимерных матриц в углепластиках на их основе// Труды ВИАМ, №2 – 2011. С. 49 – 58.

58. Хабенко А.В., Долматов С.А. Оптимизация процессов отверждения материалов на основе поли-бис-малеинимидаминов с помощью метода ДСК // Пластические массы, 1987. № 9. С. 44–45.

59. Малышева Г.В., Ахметова Э.Ш., Шимина Ю.Ю. Оценка температур фазовых переходов полимерных связующих методом дифференциально-сканирующей калориметрии// Клеи. Герметики. Технологии, 2014. № 6. С. 29–33.

60. Антюфеева Н.В., Алексашин В.М. Применение методов термического анализа для определения показателей технологических и эксплуатационных свойств материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник, 2017. №1. С.55–64.

61. Основы технологической подготовки: учеб. пособие / под ред. А.Е. Гвоздева. Изд. 2-е, испр. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. - 187 с.

62. Хасков М.А., Мельников Д.А., Котова Е.В. Подбор температурно-временных режимов отверждения эпоксидных связующих с учетом масштабного фактора// Клеи. Герметики. Технологии, 2017. № 10. С. 24.

63. Богданович П.Н., Ткачук Д.В., Белов В.М. Методы регистрации температуры при трении и механической обработке твердых тел// Трение и износ, Т.27 – Июль, 2006. С. 444 – 456.

64. Кузнецова Е.В., Вавель А.Ю. Параметры процесса механической обработки с учетом температурных режимов// Вестник ПНИПУ, Пермь – 2013. С. 136 – 147.

65. Тарасюк А.П., Назаркина А.А.. Выбор рациональных условий резания резания полимерных композитов, обеспечивающих максимальные показатели качества поверхности //Машинобудування: Збирник наукових праць: Українська інженерно-педагогічна академія (Харьков). № 10 – 2012. С. 115 – 127.

66. Петров В.М., Иванов О.А., Федосов Ф.В. Достижение заданных параметров качества поверхности деталей из углепластиков путем механической обработки// Вопросы материаловедения. 2006. № 2 (46). С. 85 – 99.

67. Белецкий Е.Н., Петров В.М., Сойту Н.Ю. Особенности процесса резания композиционных углепластиков лезвийным инструментом без охлаждения

и с модифицированными смазочно-охлаждающими технологическими средами //Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. Т. 3. № 1 (40). С. 42-46.

68. Ларин А.А., Бакулин В.Н., Резниченко В.И. Повышение точности определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов за счет применения компьютерной рентгеновской томографии // В сборнике: XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики сборник докладов, 2015. С. 2248-2249.

69. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов / Н.В. Верезуб, А.П. Хавин, А.А. Гетманов, А.П Тарасюк. – Харьков: ХНАДУ (ХАДИ), 2012. – 180 с.

70. Насонов Ф.А., Морозов Б.Б., Зинин А.В., Бухаров С.В., Харченко К.Д. Оценка эффективности метода ремонта отверстий под крепеж в композитных элементах путем установки стеклопластиковой втулки термокомпрессионным способом //Ремонт. Восстановление. Модернизация. № 10 – 2018. С. 13 – 16.

71. Биткин В.Е., Денисов А.В., Денисова М.А., Жидкова О.Г., Назаров Е.В., Рогальская О.И., Мелентьев А.В., Мизинова И.А. Апробирование технологического комплекса изготовления силовых и высокоточных размеростабильных элементов конструкций интегрального типа из волокнистых композиционных материалов //Известия Самарского научного центра РАН, т.16, № 1 (5), 2014. С. 1320 – 1327.

72. Nasonov F.A., Morozov B.B., Zinin A.V., Bukharov S.V., Kharchenko K.D. Increasing the strength and fracture toughness of the point of connection of composite elements by constructive-technological method // The 5th International Scientific And Practical Conference - 2018, Rigas Aeronautic Institute. P. 52 – 56.

73. Насонов Ф.А. Разработка метода ремонта крепежных отверстий в изделиях из углепластика с помощью установки стеклопластиковой втулки // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов: Т.3: М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. С. 478 – 479.

74. Насонов Ф.А., Морозов Б.Б., Бухаров С.В. К вопросу о ремонте отверстий под разъемные соединения в изделиях из углепластика с помощью установки стеклопластиковой втулки // Наука и технологии. Том 1. Материалы XXXVI Всероссийской конференции, посвященной памяти референта МСНТ Н.Н. Ершовой. – М.: РАН, 2016. С. 91 – 100.

75. Насонов Ф.А. Разработка метода ремонта отверстий под разъемные соединения в изделиях из углепластика с помощью установки стеклопластиковой втулки // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли. Сборник докладов. Том 1. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2016. – Т. 1. С. 779 – 784.

76. Насонов Ф.А., Морозов Б.Б., Зинин А.В., Бухаров С.В., Харченко К.Д. Оценка эффективности метода ремонта отверстий под крепеж в композитных элементах путем установки стеклопластиковой втулки термокомпрессионным способом // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 9. С. 13 – 16.

77. Насонов Ф.А., Морозов Б.Б. Особенности применения клеевых препрегов расплавного типа при ремонте деталей из стеклопластика // Тезисы докладов XX МНТК Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов, Обнинск, 2013. С. 214 – 215.

78. Насонов Ф.А. Исследование конструктивно-технологических параметров ремонтных соединений при восстановлении поврежденных деталей из ПКМ // Сборник докладов МНПК АКТО-2014, КАИ-КНИТУ, 2014. Т. 2. С. 130 – 132.

79. Дударьков Ю.И., Левченко Е.А., Лимонин М.В. Влияние структуры пакета на краевые эффекта в слоистых композитах // Исследования наукограда, 2014, № 3 (9), с. 25 – 30.

80. Полилов А.Н., Стрекалов В.Б. Введение характерного размера для описания масштабного эффекта в условиях концентрации напряжений в композитах// Проблемы прочности, 1984, №12, с.52-65

81. Whitney J. M., Nuismer R. J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations.—J. Composite Mater., 1974, 8, N3, p. 253—265.

82. Корнев В.М. Распределение напряжений и раскрытие трещин в зоне предразрушения (подход Нейбера – Новожилова) // Физическая мезомеханика, № 3, 2004. С. 53 – 62.

83. Сукнев С.В. Критерий фиктивной трещины: преимущества и ограничения.// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. № 10 – 2009. Т.75. С. 45 – 51.

84. Ву Э. Прочность и разрушение композитов.— В кн.: Разрушение и усталость. М. : Мир, 1978, с. 206—265.

85. Котов П.И., Сухов С.В., Зинин А.В. Практическая механика разрушения. Т.2. М.-МАТИ. 2012., 276 с.

86. Савин Г. Н., Ван Фо Фы Г. А. Распределение напряжений около эллиптического отверстия в пластинке из волокнистых материалов.— Прикл. механика, 1966, 2, вып. 5, с. 5—11.

87. Bowie O. L. Analysis of an infinite plate containing radial cracks originating at the boundary of an internal circular hole.—J. Math. Phys.. 1956. 35. p. 60—67.

88. Милейко С. Т., Хохлов В. К., Сулеймпнов Ф. Х. Разрушение композитного материала с макродефектом.— Механика композит, материалов, 1981, №2 с. 358— 362.