

На правах рукописи



НАСОНОВ ФЕДОР АНДРЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ КРЕПЕЖНЫХ ОТВЕРСТИЙ И РАЗРАБОТКА
СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ИХ ВЛИЯНИЯ НА НЕСУЩЮЮ СПОСОБНОСТЬ
ЭПОКСИУГЛЕПЛАСТИКОВ**

Специальность

05.16.09 – Материаловедение (Машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре «Технология композиционных материалов, конструкций и микросистем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бухаров Сергей Викторович

Официальные оппоненты: **Ковалев Игорь Евгеньевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГУП «Центральный
аэрогидродинамический институт имени
профессора Н.Е. Жуковского», начальник
научно-исследовательского комплекса

Гареев Артур Радикович
кандидат технических наук,
АО «Научно-исследовательский институт
конструкционных материалов на основе
графита «НИИГрафит», заместитель
директора

Ведущая организация: АО «Обнинское научно-производственное
предприятие «Технология» им. А.Г.
Ромашина»

Защита диссертации состоится 27 декабря 2018 года в 14⁰⁰ часов на заседании Диссертационного совета Д212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mat.i.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=98178.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.В. Скворцова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря своим высоким показателям удельных характеристик конструктивных свойств и высокой технологичности способов формования изделий различной функциональности и неоспоримым преимуществам по сравнению с традиционными металлическими материалами все шире применяются в различных областях техники, прежде всего в авиационной промышленности. Объем применения ПКМ в конструкции планера ряда современных и перспективных гражданских и боевых самолетов в настоящее время начинает превышать 40 % по массе и 80 % по площади внешнего контура летательного аппарата (ЛА).

Возросшее доверие конструкторов авиационной техники к полимерным композиционным материалам и накопленный опыт их применения в силовых деталях и агрегатах, в том числе крупногабаритных и сборочных конструкциях, требует от технологов при создании новой техники разработки процессов их производства с минимальной технологической дефектностью и повышения устойчивости к дефектам, образующимся на этапе эксплуатации. Общеизвестным является суждение о неизбежности образования дефектов на стадии производства изделий из углепластиков и других волокнистых полимерных композиционных материалов. В связи с этим проектирование конструкций ведется с учетом первоначальной технологической дефектности ПКМ, их работы в поле допустимых размеров и количества дефектов, обеспечивающих при заданных коэффициентах запаса прочности требуемые ресурс и срок эксплуатации авиационных конструкций.

Подавляющее количество соединений крупногабаритных деталей и узлов из ПКМ осуществляется с помощью достаточно большого количества механических крепежных элементов в виде болтовых и заклепочных соединений, требующих создания отверстий методами механической обработки. При этом остро стоят проблемы образования дефектов в крепежных отверстиях, полученных в ПКМ, и в частности углепластиках, на стадии производства деталей, сборки конструкций, а также их легкой повреждаемости в процессе эксплуатации, вызывающих снижение несущей способности и остаточного ресурса деталей, узлов и агрегатов.

Поэтому решение задач, связанных со снижением дефектности отверстий в деталях из ПКМ и сборочных конструкциях на их основе с целью сохранения их несущей способности, является актуальной проблемой современного авиационного материаловедения.

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.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

- проанализировать виды и условия образования дефектов в отверстиях ПКМ на стадии производства деталей и сборки агрегатов, а также отечественный и зарубежный опыт снижения их негативного влияния на несущую способность авиационных конструкций;

- разработать и экспериментально подтвердить эффективность материаловедческого подхода к решению повреждаемости эпоксидных матриц и углепластиков при формировании в них отверстий методами механической обработки;

- разработать конструктивно-технологические решения восстановления несущей способности эпоксидных углепластиков подкреплением отверстий путем установки в них стеклопластиковых втулок;

- определить границы применения и эффективности предложенных конструкторско-технологических решений подкрепления крепежных отверстий и восстановления несущей способности эпоксидных углепластиков расчетно-аналитическим методом и компьютерным моделированием.

Научную новизну имеют следующие результаты работы:

- классификация дефектов и анализ причин их возникновения в отверстиях ПКМ, позволяющие определить материаловедческие и конструкторско-технологические возможности снижения их негативного влияния на несущую способность монолитных эпоксидных углепластиков;

- метод модификации эпоксидных матриц и углепластиков на их основе стеаратом цинка, обеспечивающий улучшение 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 на 20 % значений коэффициента трения, значений температуры резания в зависимости от толщины образцов на 50 – 60 % и типа режущего инструмента - на 60 – 70 %, а также шероховатости поверхности стенок отверстий - 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 %;

- способ снижения негативного влияния дефектов в крепежных отверстиях конструкционных эпоксидных углепластиков путем установки в крепежных отверстиях стеклопластиковых втулок термокомпрессионным методом, выполняющих роль стопперов и обеспечивающих повышение несущей способности эпоксидных углепластиков по результатам

экспериментальной оценки до 15 %, а по теоретическим расчетам – на 27 %, и компьютерному моделированию: на 20 – 27 %.

Практическая значимость работы. На основании результатов проведенных исследований разработаны материаловедческие, технологические методы и конструкторские решения, позволившие:

- выбрать тип и способ введения в эпоксидные связующие модификатора - стеарата цинка, его наиболее эффективные концентрации, обеспечивающие снижение повреждаемости отвержденных эпоксидных матриц и образцов углепластиков различной толщины при формировании в них отверстий методами механической обработки разным типом обрабатывающего инструмента и разных условиях резания;

- разработать методы оценки повреждаемости матриц и углепластиков по критериям шероховатости поверхности стенок отверстий и показателям структурной однородности материала вблизи контуров отверстий;

- разработать оснастку, технологию сборки пакета-заготовки эпоксигластиковой втулки методом окружной намотки, технологию монтажа заготовки в отверстиях эпоксигластиков и технологические параметры процесса термокомпрессионного формования подкрепляющих втулок, позволяющие достигнуть повышения несущей способности конструкции до 15 % в сравнении с аналогичными конструкциями без подкрепляющих втулок;

- разработать типовой технологический процесс, технологические рекомендации и методику отработки оптимальных параметров технологического процесса постановки композитных стеклопластиковых втулок термокомпрессионным методом (в том числе с односторонним подходом) для условий опытного и серийных производств деталей и сборочных конструкций.

На защиту выносятся:

- классификация и результаты анализа материаловедческих и технологических возможностей снижения дефектности отверстий и их негативного влияния на несущую способность конструкций из ПКМ;

- результаты экспериментальных исследований эффекта модификации стеаратом цинка эпоксидных матриц и углепластиков на образование дефектов при формировании отверстий и их механические свойства;

- результаты экспериментально-теоретических исследований эффекта подкрепления стеклопластиковыми втулками крепежных отверстий на несущую способность эпоксигластиков.

Достоверность и обоснованность результатов исследования:

Применение стандартных поверенных и аттестованных средств измерений, использование современных методов исследования, таких как

дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), дифференциальный механический анализ (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 заключается:

- в разработке и практической реализации программы исследований материаловедческого подхода снижения негативного влияния дефектов отверстий на механические свойства модифицированных стеаратом цинка эпоксидных матриц и несущей способности углепластиков на их основе;

- в разработке и экспериментально-теоретическом подтверждении эффективности конструкторско-технологического метода снижения негативного влияния дефектности отверстий и повышения несущей способности эпоксиглепластиков путем упрочнения отверстий эпоксистерклопластиковыми втулками;

- в участии в проектировании и изготовлении оснастки для изготовления образцов всех методов экспериментальных исследований, в изготовлении композитных образцов методами поперечной пропитки и вакуум-автоклавного формования, в проведении структурных исследований и механических испытаний;

- в участии в подготовке основных публикаций по результатам исследований и в составлении рекомендаций и технологической документации для внедрения результатов исследований.

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 г.;

- 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 г.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, практическая значимость результатов исследований и основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы по проблематике 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, по классификациям дефектов и повреждений ПКМ по различным признакам, в т.ч. по производственной и эксплуатационной природе. Особое внимание уделено дефектам, связанными с отверстиями для механических точечных соединений деталей, узлов и агрегатов из ПКМ. Проведено обозрение данных по снижению остаточной прочности и ресурса конструкций из углепластиков с такими несоответствиями и дана оценка предложенным в литературе современным и перспективным путям решения данной проблемы с учетом их технологической реализуемости, а также имеющихся конструктивных и прочих ограничений.

На основании анализа литературных данных показана возможность дальнейшего изыскания эффективных путей решения поставленных задач.

Во второй главе содержатся сведения об объектах и методах исследования. Для проверки материаловедческого подхода к решению задач в качестве экспериментального материала выступает связующее ЭД-20+ПЭПА и углепластик на его основе Р.14535/ЭД-20+ПЭПА, в котором в качестве наполнителя применена однонаправленная углеродная лента с стеклянной уточной нитью фирмы Porcher артикула Р.14535. Для модификации полимерной матрицы и углепластика на ее основе был использован наноразмерный порошок стеарата цинка (со степенью чистоты «ч.д.а.»).

Конструктивно-технологический подход проверен и отработан на широко применяемом в авиационной промышленности конструкционном эпоксиглепластике ВКУ-30К.Р14535 на основе эпоксидного связующего марки ВСК-14-3 и однонаправленной углеродной ленте со стеклянной уточной нитью фирмы Porcher артикула Р.14535, материал упрочняющих элементов – стеклопластик конструкционного и радиотехнического назначения ВПС-32К10 (на основе эпоксидного связующего марки ВСК-14-4 и стеклоткани Т-10).

В работе использованы следующие методы исследований материалов.

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 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 динамического механического анализа 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 соответствии 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 было 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.

В третьей главе приведены результаты исследований целевого модифицирования матриц и углепластиков на их основе. В качестве материаловедческого подхода к управлению количеством дефектов с максимально возможным их снижением вследствие процессов механической обработки при образовании отверстий для крепежных элементов предлагается использование модифицирования эпоксидных матриц наноразмерными частицами стеарата цинка. Повреждаемость материала в данном случае рассматривается как результат многих факторов, в т.ч. возникновение повышенных температур в зоне резания, обуславливающих достижение и превышение рабочих температур материала, температур стеклования и температур термодеструкции. Стеарат цинка, как антифрикционная добавка, снижает силы трения и силы резания, и, следовательно, количество энергии, переходящее в тепло, что с учетом низких теплопроводности и теплоемкости композитов создает более оптимальные условия для механической обработки.

Материаловедческий подход к управлению физико-механическими свойствами полимерных матриц требует оценки влияния модифицирующих добавок на технологические и основные эксплуатационные свойства композиций. Технологические свойства напрямую влияют на выбор и назначение основных и второстепенных параметров технологического процесса, обеспечивают достижение оптимальных технико-экономических показателей технологического процесса. Так, были проведены работы по исследованию и сопоставлению важнейших технологических свойств исходной эпоксидной композиции и модифицированной технологической добавкой. Показано в частности, что введение модифицирующей добавки в

концентрации в интервале 0,1 – 5,0 % практически не влияет на смачивающую способность поверхностей модельной стеклянной подложки или графитовой полированной пластинки. Введение добавки, осуществленное с применением ультразвукового диспергирования (с излучателем мощностью 50 Ватт в течение 15 минут), влияет на условную вязкость связующего, но в диапазоне, не препятствующем эффективной пропитке наполнителя. Исследовано возможное влияние вводимой добавки на кинетику отверждения. С помощью серии произведенных измерений методом ДСК тепловых эффектов реакции отверждения образцов связующих с различными концентрациями модификатора при различных скоростях и их обработке с помощью компьютерной программы «Kinetics 3», создана кинетическая модель отверждения, позволяющая прогнозировать степень отверждения связующего в зависимости от температурно-временных параметров отверждения с учетом концентрации модифицирующей добавки. В рассмотренном случае стеарат цинка является слабоингибирующей добавкой, незначительно замедляющей ход реакции отверждения. Данное влияние может быть учтено технологом, что с заданной степенью точности позволяет созданная модель, при проектировании технологических процессов изготовления изделий с помощью корректировок температурно-временных параметров процессов.

Влияние на основные эксплуатационные свойства определяет возможность обеспечения заданных характеристик материала в изделии на стадии эксплуатации. Методом ДМА проведены измерения температур стеклования в зависимости от степени модифицирования матриц. Наблюдается снижение температуры стеклования для концентраций 0,2 – 0,5 % масс. на величины не более 8 – 10 °С, с последующим их восстановлением. Таким образом, влияние на теплостойкость матриц и углепластиков на их основе минимально.

Было проведено опытное изготовление экспериментальных матричных и углепластиковых образцов. Матричные образцы изготавливались методом заливки в разборную форму связующих, модифицированных различным количеством добавки в интервале от 0,1 до 5,0 % масс. с последующим отверждением в вакуумном сушильном шкафу.

Экспериментальные углепластиковые образцы изготавливались на основе тех же связующих с модифицирующими добавками в концентрациях от 0,1 до 5,0 % масс. посредством жидкофазного совмещения связующего и углеродного наполнителя в виде углеродной ленты с редким стеклянным утком арт. Р.14535 с реализацией поперечной пропитки с последующим формованием вакуум-автоклавным методом.

Для экспериментальных образцов были реализованы схемы армирования однонаправленная (0 °) и ортотропная (0°/90°). Для углепластиковых образцов после формования был проведен выходной неразрушающий контроль акустическим импедансным методом с помощью дефектоскопа ДАМИ-С08 с преобразователем типа ПАДИ-8 в соответствии с ПИ 1.2.171-81. Проведены механические испытания стандартных

углепластиковых образцов на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг. Результаты механических испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1. 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

Показано, что модифицирование эпоксидной матрицы и конструкционного углепластика на ее основе, полученного методом пропитки под давлением с последующим вакуум-автоклавным формованием в диапазоне концентраций от 0 до 5,0 % не снижает прочностных показателей для нагружений типа растяжение и сжатие. Наблюдается снижение прочности при межслоевом сдвиге при концентрациях, приближающихся к 5 % со значений 3 %. Для нагружений типа растяжение и сжатие наблюдаются максимумы показателей при 0,5 и от 0,1 до 0,3 % соответственно. Таким образом, модифицирование наноразмерной добавкой стеарата цинка значительно не влияет на возможность реализации технологического процесса изготовления изделий, данные изменения могут быть нивелированы незначительной корректировкой параметров процесса, обеспечивается возможность получения материалов с как минимум несниженными основными эксплуатационными свойствами.

Для выявления эффективности целевого модифицирования на условия механической обработки при образовании отверстий, а, следовательно, на дефектность контуров отверстий и зон вблизи них, изготовленные матричные и углепластиковые образцы были исследованы методом ИК-термографии в момент образования отверстий (рисунок 1).

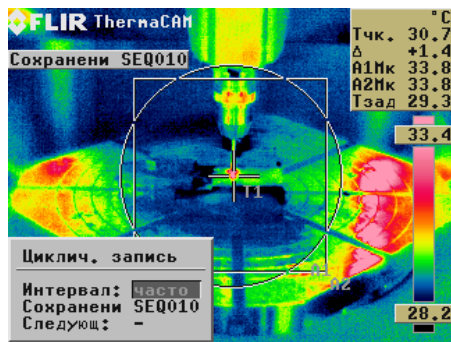


Рисунок 1 – Пример кадра съемки тепловой картины процесса образования отверстия методом механической обработки

Экспериментально установлено, что при введении модификатора в эпоксидное связующее, в матричных образцах, а также углепластиковых образцах на их основе, количественно меняется картина процесса механической обработки по критерию максимальных температур в зоне резания (как интегральная характеристика процесса), в зависимости от концентрации модифицирующей добавки и применяемого типа инструмента (рисунок 2).

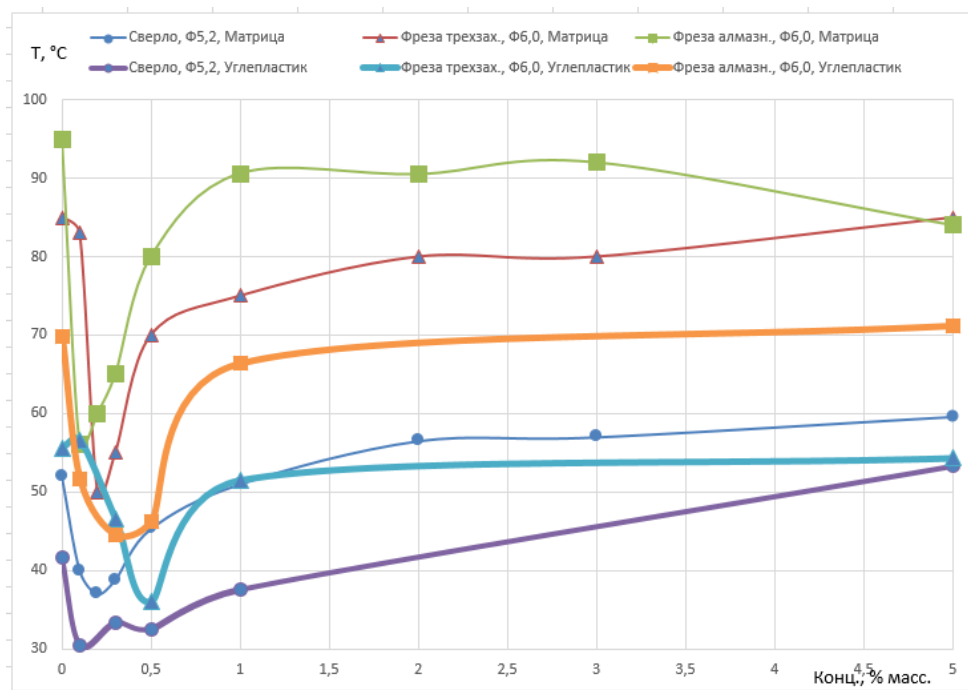


Рисунок 2 – Графическое представление усредненных (по трем точкам) зависимостей температурного максимума процесса образования отверстий в матричных и углепластиковых образцах. Линии для углепластиков имеют удвоенную толщину начертания

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, 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 качество (в т.ч. благодаря снижению термических усадок).

Подвергнутые механической обработке образцы были исследованы методами от менее к более чувствительным. Так, рентгеновским методом было установлено отсутствие появившихся дефектов в пределах его разрешающей способности. Была проведена акустическая томография углепластиковых образцов с использованием рабочих стандартных (настроечных) образцов для сравнения: дефекты общей структуры материала, в том числе вблизи отверстий найдены не были.

Конструктивные особенности матричных образцов (толщины 4,5 мм) позволили исследовать внутреннюю поверхность образованных отверстий с помощью профилометрического метода.

По результатам измерений (не менее 5 измерений на каждую точку) можно наблюдать (рисунок 3), что с добавлением модификатора в количестве 0,1 % масс. происходит снижение параметра шероховатости R_a (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.

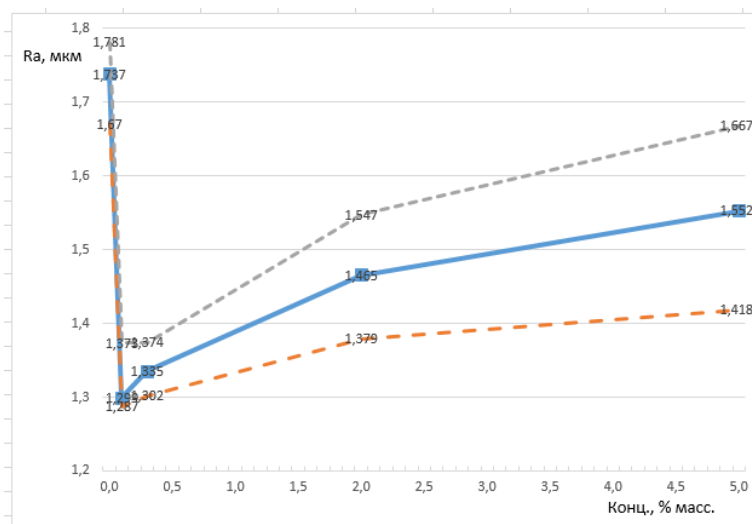


Рисунок 3 – Зависимость значения шероховатости и разброса показателя от концентрации модификатора

Данные зависимости в целом следуют тенденциям и хорошо согласуются с результатами измерений температурных показателей.

Проводилось исследование экспериментальных углепластиковых образцов с помощью активно внедряемого в настоящее время метода компьютерной рентгеновской томографии. При постоянной толщине исследуемого сечения образца, коэффициент ослабления зависит только от плотности материала, которая в общем виде связана с особенностями его структуры. В данном методе термин структурная плотность характеризует структуру материала с учетом внутренних дефектов различного уровня и локальных уплотнений материала. Исходя из анализа томограмм и количественной оценки выходных показателей: среднее значение локального коэффициента ослабления ($\mu_{\text{ср}}$) (параметр определяющий рыхлость материала и учитывающий уровень отклонений от среднего значения и определяющий разнородность структуры материала), например, для образца «1к» (немодифицированного) - 15 единиц, для образцов «2к» ... «4к» (концентрации от 0,1 до 1,0 % масс.) - 4 – 5 единиц, можно судить о более высокой стабильности структуры материала вокруг контуров отверстий для образцов, изготовленных на основе связующего с введением модификатора в концентрации от 0,1 до 1,0 % масс.

В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментально-теоретических исследований конструктивно-технологического метода упрочнения крепежных отверстий в углепластиках. 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 связи с этим необходимо посредством конструктивно-технологических мероприятий организовать НДС в зоне крепежных точек таким образом, чтобы получить повышение несущей способности.

Показано, что с применением установленных в отверстие под крепеж элементов, имеющих более низкий модуль упругости элементов, чем основной материал (углепластик) и материал крепежных элементов (стальные, титановые болты и заклепки), возможно снизить резкое возрастание действующих напряжений на контурах отверстий. Уровень возникающих напряжений еще более критичен, если у края отверстий имеются зарождения дефектности, в качестве которой можно рассматривать, например, повышенную шероховатость внутренней поверхности отверстий, изменения структурной плотности материала вблизи контуров, участки деструктурированного материала.

В целях снижения влияния дефектов и повреждений зоны 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.

В работе сформулированы требования, предъявляемые к методу установки подкрепляющего элемента, а также основные базирующиеся на них принципы его формирования. Среди основных требований:

- 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, 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 и микронеровностей, идущих в радиальном направлении от контура отверстия, и расслоения (неплотности, образовавшиеся между слоями пластика).

Основным принципом формирования подкрепляющего элемента в виде втулки является свободное введение заготовки в подготовленное отверстие, высокая степень уплотнения заготовки 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.

Для реализации обозначенного способа необходимо спроектировать и изготовить оснастку и специальные приспособления, которые обеспечат проведение технологического процесса и качественное поддержание его параметров. В частности, сформулированы основные требования к эластичным формующим элементам (ЭФЭ), как основным рабочим инструментам для реализации термокомпрессионного метода: высокая эластичность, необходимая для равномерного распределения давления формования; значения КЛТР в пределах $2 \cdot 10^{-4}$ - $4 \cdot 10^{-4}$ K^{-1} , стабильные в процессе применения; стабильностью свойств при циклическом воздействии температур отверждения и давлениях формования; твердость в пределах 35 – 50 единиц по Шору А; приспособленность к нанесению разделительных антиадгезионных слоев; высокая степень готовности для применения.

Указанным требованиям удовлетворяют профилированные материалы, например, кремнийорганические резины НИИ РП: «ИРП-1265», «СП-111», «СП-121». При необходимости для изготовления оправок с предварительным формообразованием (например, более сложной конфигурации) могут быть использованы многокомпонентные кремнийорганические компаунды, например, марок «Виксинт У-2-28» и «Пентэласт-750А».

Принципиальная схема реализации технологического процесса приведена на рисунке 4.



Рисунок 4– Блок-схема, укрупненно отражающая технологический процесс установки композитной втулки термокомпрессионным методом

В случае применения заготовок волокнистых ПКМ, например, стеклопластиков, задается схема армирования самой заготовки. На рисунке 5 приведен эскиз исполнения втулки, при этом задана схема армирования – радиальная. Метод формообразования заготовки – окружная намотка.

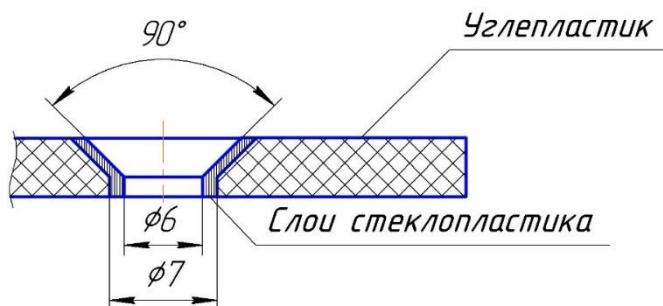


Рисунок 5 – Эскиз исполнения отверстия под крепеж с стеклопластиковой втулкой

Для обеспечения заданной схемы армирования необходимо раскроить заготовку полуфабриката стеклопластика (препрега) соответствующим образом. На рисунке 6 приведен пример раскроя заготовки.

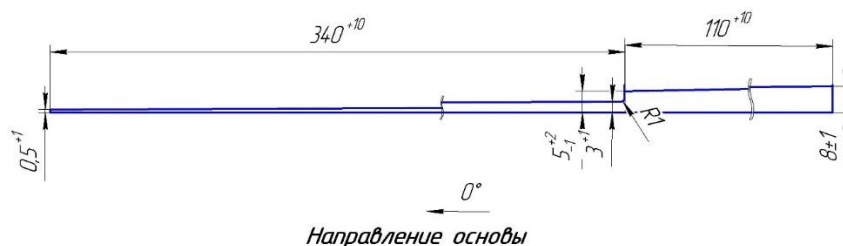


Рисунок 6 – Схема раскроя препрега для заготовки

В работе показан порядок расчета и назначения параметров процесса, в том числе, при какой температуре будет компенсирован зазор и начнется нарастание формующего давления и его величина (с учетом коэффициента термокомпрессии ЭФЭ, начальной температуры, температуры отверждения).

Общий вид установленной методом втулки в поперечном сечении приведен на рисунке 7.

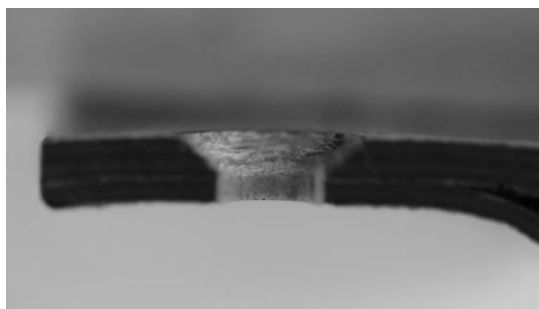


Рисунок 7– Поперечное сечение установленной стеклопластиковой втулки в монолитную углепластиковую панель

В работе 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.

В пятой главе приводятся результаты оценки эффективности конструктивно-технологического решения установки подкрепляющей втулки термокомпрессионным методом. 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.

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

Теоретическое обоснование выражается в создании модели «затупления отверстия», как концентратора напряжений (рисунок 8).

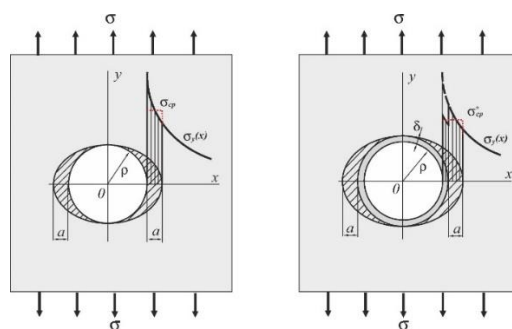


Рисунок 8 – Модель нагружения плоской панели

а - без втулки; б – с втулкой

Рассматривая с позиций механики разрушения втулку как «стоппер» трещин вследствие наличия области с низко модульным материалом (втулка) и области высоко модульного материала (углепластиковая панель), с учетом размеров зоны предразрушения, подсчитанных по известным характеристикам прочности и трещиностойкости, выведено соотношение концентраций напряжений для случаев без втулки и с втулкой, равное $\frac{K_{\sigma}}{K_{\sigma}^*} \approx 1,27$.

Для сравнительной оценки НДС методами конечно-элементного (КЭ) анализа в среде MSC.Nastran выполнено моделирование углепластиковых панелей, содержащих свободное отверстие под крепеж и подкрепленное стеклопластиковой втулкой (рисунки 9 - 11). В 3D-моделях применялись трехмерные Solid-элементы - тетраэдры с 4 и 8 узлами.

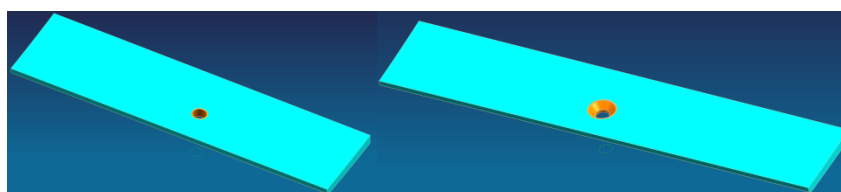


Рисунок 9 - Твёрдотельные модели углепластиковых панелей

В модели учтены схема армирования панели – $[0^0/0^0/\pm 45^0/90^0/\pm 45^0/0^0/0^0]_{4S}$, типовая для регулярной зоны конструктивного элемента планера ЛА и схема армирования стеклопластиковой втулки – окружного направления («спираль»).

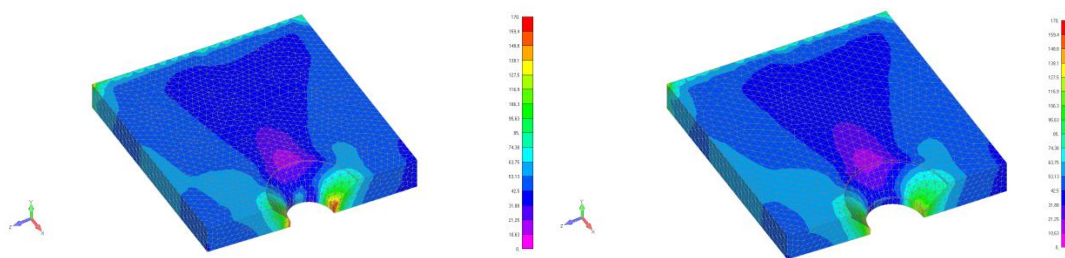


Рисунок 10 - Схема распределения механических напряжений для углепластикового образца без втулки (слева) и с втулкой (справа), установленной в отверстие с конической прозенковкой. Сама стеклопластиковая втулка не показана для удобства считывания картины распределения напряжений в углепластике

КЭМ	Исполнение	Отн. стат. прочность, %	КЭМ	Исполнение	Отн. стат. прочность, %
	Цилиндрическое отверстие, без втулки	100		Цилиндрическое отверстие, надрез, без втулки	93,4
	Цилиндрическое отверстие, втулка	114 - 122		Цилиндрическое отверстие, надрез, втулка	114 - 120
	Проzenкованное отверстие, без втулки	65 - 76		Проzenкованное отверстие, надрез, без втулки	56
	Проzenкованное отверстие, втулка	101 - 110		Проzenкованное отверстие, надрез, втулка	101 - 110

Рисунок 11 – Результаты компьютерного моделирования цилиндрических и зенкованных отверстий и наличия условного надреза, без подкрепляющих втулок и с ними

Сравнение полученных результатов с результатами механических испытаний конструктивно подобных образцов до разрушения приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты 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

Таким образом, 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. В результате анализа влияния производственных дефектов в отверстиях под крепежные элементы на несущую способность авиационных конструкций, изготовленных из современных полимерных композиционных материалов показано, что основными дефектами являются: повышенная шероховатость поверхности стенок отверстия, вызванная механическими повреждениями матрицы, волокна и межслоевого микрорасслоения, а также частичной деструкцией полимерной матрицы, вызванной повышением температуры резания при сверлении отверстий, зависящий от коэффициента трения, типа обрабатывающего инструмента, условий резания и толщины обрабатываемого материала, что определило направление экспериментальных и расчетно-теоретических исследований.

2. Разработан и проверен материаловедческий подход к решению обозначенной проблемы в виде модифицирования эпоксидных связующих, на основе которых применяются современные и создаются новые эпоксидные пластики конструкционного назначения. На модельном эпоксидном связующем и экспериментальном углепластике на его основе исследовано влияние модифицирования на дефектность отверстий и основные технологические и эксплуатационные свойства материалов. Установлена наиболее эффективная концентрация модификатора в количестве 0,1 - 0,3 % масс., приводящая к снижению температуры резания в зависимости от толщины матричных и углепластиковых образцов на 50 - 60 % и типа режущего инструмента - на 60 - 70 %, шероховатости поверхности стенок отверстия - на 20 - 25 %. В углепластике эффект модификации матрицы приводит к снижению дефектности в виде структурной неоднородности материала вблизи отверстия на 65 – 70 %.

Кроме того показано незначительное влияние на смачивающую способность поверхности стеклянных и графитовых пластин, моделирующих поверхности волокон армирующих наполнителей, реологические свойства и кинетику отверждения, что позволяет использовать общепринятые технологии совмещения модифицированного связующего с углеродными волокнистыми наполнителями и формования изделий на их основе. Определено влияние на кинетику отверждения, создана модель, которая позволяет корректировать параметры процессов отверждения с учетом этих незначительных влияний. Показано отсутствие отрицательного влияния на основные механические свойства и теплостойкость.

3. Обоснована возможная эффективность установки подкрепляющих отверстия под механический крепеж элементов, выполняющих роль «стопперов», снижающих значения механических напряжений на краях отверстий. Разработан и экспериментально проверено конструктивно-технологическое решение по установке подкрепляющих отверстия композитных стеклопластиковых втулок термокомпрессионным методом, спроектирован типовой технологический процесс, выработаны требования, предъявляемые к оснастке, в том числе к эластичным формующим элементам, рассмотрены возможные пути адаптации метода к условиям опытных, серийных производств и полевого ремонта.

4. Проведена оценка предложенных конструктивно-технологических решений с учетом реализованного технологического процесса и реальных типовых зон композитных агрегатов боевого ЛА по подкреплению отверстий под крепежные элементы. Повышение несущей способности конструкционных эпоксиуглепластиков по результатам экспериментальной оценки по испытанию конструктивно-подобных образцов достигает величины 15 %, которое подтверждается расчетно-аналитическими методами с использованием модели затупления трещин со стопперами в отверстиях, где это значение достигает 27 %, а при использовании компьютерного моделирования оно имеет значения в интервале 20 – 27 % в зависимости от таких конструктивных особенностей подкрепляемых эпоксиуглепластиков и устанавливаемых эпокси-стеклопластиковых втулок, как схемы армирования и значения упруго-прочностных свойств монослоев.

Список основных трудов по теме диссертации:

в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Насонов Ф.А., Морозов Б.Б. Выбор конструктивно-технологических параметров при ремонте авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2014. № 12. С. 11 – 16.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Насонов Ф.А., Бухаров С.В. Исследование влияния целевого модифицирования эпоксидных матриц и углепластиков на их основе на температуру в зоне резания при образовании отверстий // Вестник ИРНИТУ. 2018. № 10. С. 152 – 161.

в других изданиях:

6. Nasonov F.A., Zinin A.V., Bukharov S.V., Kharchenko K.D., Piskunov G.S. 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.

7. Nasonov F.A. , Bukharov S.V. Study of thermal mechanical processing of modified epoxy matrixes and carbon fiber plastic on their basis // Advanced Engineer Research. 2018. V. 158. P. 303 – 307

15. 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.

16. 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.

19. 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.

20. Насонов Ф.А., Бухаров С.В. Глава 3. Исследование эффективности целевого модифицирования углепластика и применения стеклопластиковых втулок при решении проблем микроповреждаемости конструкционных углепластиков при образовании отверстий методами механической обработки // Итоги науки. Выпуск 32. – Избранные труды Всероссийской конференции по новым технологиям. – М.: РАН, 2017. С. 64 – 82.

21. Насонов Ф.А., Морозов Б.Б., Зинин А.В., Бухаров С.В., Харченко К.Д., Пискунов Г.С. Повышение прочности и трещиностойкости точечных соединений композитных элементов конструктивно-технологическим методом // Тезисы докладов XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», М.: МАИ, 2018. С. 64 – 66.

22. Насонов Ф.А. Исследование методом ИК-термографии тепловых эффектов процессов образования отверстий с помощью механической обработки в модифицированных конструкционных эпоксиуглепластиках // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, 8-10 августа 2018 г.: Материалы конференции. Материалы докладов. Казань: Т. 2018. С. 230 – 233.

23. Насонов Ф.А., Бухаров С.В., Зинин А.В. Повышение несущей способности и трещиностойкости точечных соединений композитных элементов конструктивно-технологическим методом установки стеклопластикового подкрепляющего элемента // Тезисы докладов Девятого Международного Аэрокосмического Конгресса, М., 2018. С. 167 – 168.