

На правах рукописи



Федотов Алексей Александрович

**МЕТОДИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ
С ПОМОЩЬЮ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА)
Ефимов Вадим Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
Дудченко Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Михайловский Константин Валерьевич

Ведущая организация: ФГКВУ ВО ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж.

Защита состоится «23» марта 2022 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 223.011.01 при Московском государственном техническом университете гражданской авиации (МГТУ ГА) по адресу: 125493, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте www.mstuca.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 223.011.01
доктор технических наук, профессор

 Самойленко Василий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Приоритетной задачей развития гражданского сектора авиационных перевозок остается обеспечение высокого уровня безопасности полетов наряду с повышением эффективности коммерческой деятельности авиакомпаний-эксплуатантов авиационной техники (АТ).

Для удовлетворения прогнозируемого растущего спроса на воздушные перевозки авиакомпаниям потребуется увеличивать флот ежегодно, что в итоге к 2030-м годам (с учетом вывода из эксплуатации устаревших и выработавших ресурс самолетов) потребует производства и поставки нескольких десятков тысяч новых воздушных судов всех классов. Рост числа эксплуатируемых гражданских самолетов повлечет за собой и расширение объема рынка услуг по техническому обслуживанию (ТО) ВС. Кроме общего роста количества эксплуатируемых ВС прогнозируется качественное изменение состава мирового флота гражданской авиации. Основу флотов авиакомпаний составят воздушные суда нового поколения, и, следовательно, организациям, проводящим ТО, будет необходимо подготовиться к выполнению операций на новых самолетах и спланировать реализацию стратегии по отслеживанию и оперативному внедрению новых технологических, логистических и маркетинговых подходов в этом секторе авиационного бизнеса. Организации, проводящие ТО, должны будут овладеть необходимыми компетенциями для работы с конструкционными полимерными композиционными материалами (ПКМ) и гибридными металл-полимерными материалами. Применения новых подходов и технологий так же требует работа с современной и перспективной авионикой и другими системами самолета, имеющими встроенный функционал диагностики технического состояния.

Для соответствия новому этапу развития гражданской авиации предприятиям линейного технического обслуживания и техническим подразделениям авиакомпаний потребуются дополнительные усилия для приобретения и освоения нового технологического и диагностического оборудования, для обучения персонала работе с ним и получения лицензий и доступов к конструкторской и эксплуатационной документации, предоставляемой компанией-разработчиком ВС. За помощью по внедрению технологий эксплуатации и ремонта, ранее признаваемых коммерчески нецелесообразными и/или технически трудноосуществимыми авиакомпаниями, эксплуатирующие ВС, смогут обращаться в том числе и к компаниям-разработчикам АТ.

Среди прочих, к указанной выше категории операций будет относиться технологический процесс установки ремонтных заплат на поврежденные элементы планера воздушного судна при помощи клеевых составов – процедура клеевого ремонта конструкций планера. Несмотря на наличие значительной базы знаний по теории и особенностям практического применения клеевых составов при создании технических объектов различного назначения, клеевые соединения при эксплуатации АТ применяются ограниченно и, зачастую, только в тех случаях, когда другие альтернативы ремонта не сертифицированы для данной конструкции (это в первую очередь относится к ремонтным соединениям «композит-композит»). На данный момент в общем объеме ремонтных процедур клеевые ремонтные операции применяются лишь на полимерных композитных конструкциях, а также на металлических конструкциях, изначально выполненных при помощи склеивания.

Настоящая работа направлена на создание методики проектировочного расчета клеевых ремонтных соединений, достаточно простой для использования квалифицированным инженером-конструктором без глубокой переподготовки, и достаточно надежной в плане применяемых методов расчета вариантов проектируемого соединения. Использование такой методики в цепочке процесса разработки процедур ремонта позволит проводить оперативный поиск оптимальной конструкции без

привлечения на данном этапе дорогостоящих ресурсов по прочностному расчету (в первую очередь, пакетов программ, построенных на методах конечных элементов), что определяет **актуальность методики, ее значимость и практическую ценность.**

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиям клеевых соединений разнородных материалов посвящено большое число работ. Разработке теории и решению прикладной задачи расчета клеевых соединений уделяли внимание Артюхин Ю. П., Кутьинов В.Ф., Семин М.И., Турусов Р.А., Фрейдин А.С., Хватан А.М., Царахов Ю.С., Beom H.G., Duong C. N., Hart-Smith L. J., Reissner E, Rose L. R. F., Wang C. H. и др. Их наработки вошли в рекомендации по проектированию клеевых соединений различного назначения.

Вопросы эксплуатационной долговечности, усталости и старения конструкционных материалов рассматриваются в работах Дудченко А.А., Каблова Е.Н., Нестеренко Б.Г., Семина М.И., Степнова М.Н., Стрижиус В.Е., Sendeckyj G.P., Vassilopoulos A.P. и др.

Практические проблемы применения клеев и клеевых соединений для ремонта конструкций описываются в работах Аниховской Л.И., Куликова В.В., Петровой А.П., Baker A.A., Duong C. N., Wang C. H. и др.

В большинстве работ, посвященных методам расчета клеевых ремонтов, заплат, устанавливаемая на место повреждения, принимается неподверженной усталостному изменению свойств, и основной акцент расчета смещается в сторону подробного анализа ремонтируемой конструкции. В случае применения тканых композитных материалов для изготовления ремонтной заплаты такой подход представляется недостаточно достоверным.

В ходе работы над диссертацией автором была поставлена **цель** разработать метод аналитического расчета клеевых ремонтных соединений, чтобы получить удобную методику оценки качества решений, принимаемых при создании эксплуатационной документации. Для достижения поставленной цели были решены следующие **основные задачи**:

- проанализировать доступные эксплуатантам авиационной техники технологии клеевых ремонтов и области их возможного применения при ремонте эксплуатационных повреждений металлических авиационных конструкций;
- провести экспериментальные исследования усталостной прочности образцов из композиционного материала при различных значениях температуры испытаний;
- обосновать необходимость учета деградации механических свойств заплаты при расчете клеевых ремонтных соединений;
- разработать методику аналитического расчета клеевых ремонтных соединений.

Научную новизну исследования составляют:

- результаты экспериментальных исследований усталостной прочности и деградации механических свойств образцов из полимерного композиционного материала, проведенные в испытательных машинах с применением климатической камеры;
- аналитическая модель клеевого ремонта металлических конструкций композитными заплатами;
- метод учета данных по деградации механических свойств материала ремонтной заплаты под действием циклической нагрузки при расчете клеевых ремонтных соединений.

Объектом исследования являются методы ремонта авиационных конструкций.

Предметом исследования является методика расчета клеевых ремонтных соединений металлических авиационных конструкций с эксплуатационными повреждениями.

Методы исследования. Для решения задач, поставленных автором, в диссертационном исследовании использованы методы механики деформируемого твердого тела.

Автором получены следующие основные **результаты, выносимые на защиту:**

- методика оценки деградации механических свойств полимерного композиционного материала под действием усталостной нагрузки при различных значениях температуры испытаний;
- методика аналитического расчета клеевых ремонтных соединений с учетом данных по деградации механических свойств материала ремонтной заплаты под действием циклической нагрузки;
- методика проведения ускоренных конечно-элементных расчетов клеевых ремонтных соединений для сопоставления с результатами расчета по аналитической модели ремонта;
- методика оценки качества клеевых ремонтов с использованием полученных результатов усталостных испытаний материала заплаты.

Достоверность полученных результатов диссертационного исследования подтверждается корректным использованием математического аппарата теории механики деформирования и разрушения материалов, сравнением с результатами расчета аналогичной задачи другим методом расчета (методом конечных элементов); **адекватность результатов** подтверждается сравнением результатов расчета с опубликованными данными натурных экспериментов.

Личный вклад автора состоит в: разработке метода расчета клеевого ремонтного соединения с учетом переменных значений упругости ремонтной заплаты; подготовке и проведении серии натурных экспериментов для изучения степени деградации упругих свойств образцов из композиционного материала, обработке результатов проведенной серии экспериментов; адаптации методов конечно-элементного расчета для ускоренного моделирования усталостного нагружения клеевого ремонтного соединения; проведении вычислительных экспериментов, обработке результатов вычислительных экспериментов и подготовке публикаций по материалам диссертационного исследования.

Результаты работы могут **практически применяться:**

- в научно-исследовательских институтах гражданской авиации и опытно-конструкторских бюро при разработке эксплуатационной документации воздушных судов гражданской авиации;
- в опытно-конструкторских бюро при организации и проведении работ по послепродажной поддержке эксплуатируемых экземпляров воздушных судов;
- в эксплуатирующих организациях – при условии соответствующей подготовки сотрудников.

Апробация работы. Материалы и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались в ходе работы конференций и семинаров:

- 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Science – ICAS-2014 (Санкт-Петербург, 7-12 сентября 2014 г.);
- «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» (Москва, МГТУ ГА, 18-20 мая 2016 года);
- XLIII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения - 2017» (Москва, МАИ (НИУ), 5-20 апреля 2017 года);
- XXIV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, МГУ, 10-14 апреля 2017 года);
- XX Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, МАИ (НИУ), 24-31 мая 2017 года);

- III Всероссийская научно-техническая конференция «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники» (Москва, ВИАМ, 17 июля 2017 года);
- XXI Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, МАИ (НИУ), 24-31 мая 2019 года);
- научный семинар кафедры механики композитов Механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (30 ноября 2020 года);
- научный семинар кафедры РК-5 «Прикладная механика» факультета «Робототехника и комплексная автоматизация» МГТУ им. Н.Э. Баумана (11 декабря 2020 года).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 7 печатных работах, 3 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

По своей **структуре, содержанию и объему** диссертационная работа соответствует поставленным задачам и состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Диссертация изложена на 165 печатных листах текста, содержит 43 рисунка, 9 таблиц. Библиографический список насчитывает 173 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении подчеркнута и обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы и приведены положения, выносимые автором на защиту.

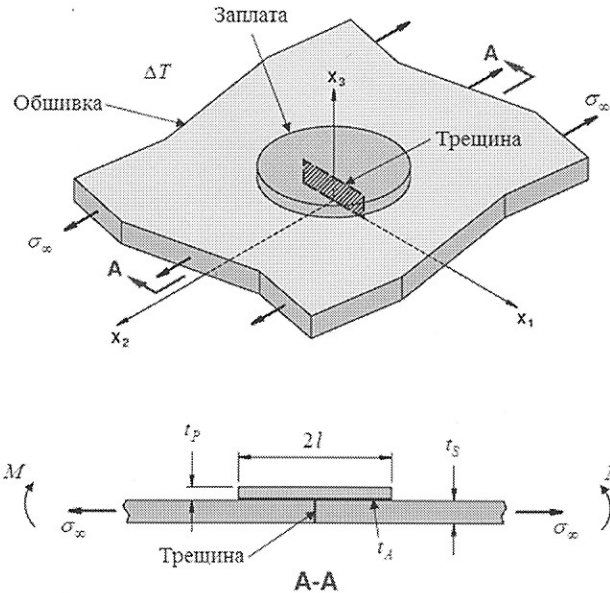
В первом разделе рассмотрены существующие технологии ремонта конструкций планера ВС и дана оценка их преимуществ и недостатков. На основании обзора литературы по теме исследования при сравнении прочностных и эксплуатационных характеристик существующих методов ремонта сделан вывод о применимости технологии клеевого ремонта для восстановления несущей способности алюминиевых конструкций АТ. В разделе описаны технологические трудности установки клеевых ремонтных заплат и указаны ограничения области применения клеевого ремонта по температуре и кривизне ремонтируемой конструкции. В первом разделе задан параметр качества проведенного ремонта – скорость развития существующего в конструкции дефекта – и обоснован выбор варианта конструкции клеевой ремонтной заплаты (усиливающая внешняя заплата) с позиции эксплуатационной технологичности установки. Выбранный вариант заплаты анализируется в ходе исследования в последующих разделах диссертации.

Второй раздел посвящен построению аналитической модели клеевого ремонта. Модель базируется на методе расчета напряженно-деформированных состояний эллиптических включений – методе инклюзии. Схема клеевого соединения показана на рисунке 1.

При нахождении напряжений и деформаций исследуемого клеевого соединения расчет разбивается на этапы:

- на первом этапе рассматривается влияние локальной заплаты на изменение исходного НДС обшивки без учета дефекта при допущении, что заплата жестко прикреплена к обшивке;
- на втором этапе производится оценка напряжений в клеевом слое при передаче воздействия от обшивки к заплате,

• на третьем этапе определяется зависимость коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины от приложенной растягивающей нагрузки, определенной этапами ранее.



$t_{s,p,a}$ - толщины обшивки, заплата и клеевой прослойки, соответственно
 l - половина длины нахлеста в клеевом соединении

Рисунок 1. Схема клеевого ремонтного соединения

Для определения вклада приклеенной заплата в изменение картины распределения напряжений обшивки рассчитываются значения характеристик упругости составной пластины (модули упругости, модули сдвига, коэффициенты Пуассона и др.), определяются напряжения в составной пластине и вычисляется доля напряжений, приходящихся на обшивку, – эти напряжения будут влиять на развитие существующего в обшивке дефекта. Примерами конструкций, демонстрирующими НДС, сходное с описанным выше, могут быть растянутые области обшивки оперения и крыла, панели обшивки фюзеляжа. Автором предлагается считать продольный модуль упругости E^P ремонтной заплата величиной переменной, зависящей от числа циклов приложенной усталостной нагрузки, т.е. при расчете распределения напряжений между составляющими элементами ремонтного соединения по методу инклюзии напряжения в заплата определяются из соотношения:

$$\sigma_{ij}^P = C_{ijkl}^P (E^P \neq const) \cdot (\varepsilon_{kl}^l - \varepsilon_{kl}^{(T)P} + (x_3 - h_0) \kappa_{kl}^l);$$

при расчете напряжений клеевого слоя уравнение прогиба составной пластины «обшивка-заплата»:

$$\frac{d^2 \omega_l}{dx^2} - \frac{P}{D_l (E^P \neq const)} = \frac{P(\hat{e} - M^{therm}/P)}{D_l (E^P \neq const)}.$$

Здесь: σ_{ij}^P – механические напряжения в заплата в составе клеевого соединения,

C_{ijkl}^P – тензор упругости заплата, ε_{kl}^l – поле деформаций соединения в зоне заплата, $\varepsilon_{kl}^{(T)P}$ – поле температурных деформаций заплата, x_3 – координата по оси, перпендикулярной плоскости обшивки, h_0 – положение срединной плоскости клеевого соединения по оси x_3 , κ_{kl}^l – поле кривизны соединения в зоне заплата, ω_l – прогиб в зоне заплата, P – растягивающее усилие в обшивке, D_l – изгибная жесткость в зоне заплата, \hat{e} – эксцентриситет приложения нагрузки, M^{therm} – момент в соединении разнородных материалов от действия температуры.

Третий раздел посвящен экспериментальным исследованиям деградации продольного модуля упругости углепластика от циклически приложенной растягивающей нагрузки. Модуль упругости материала заплатки будет одним из определяющих параметров при разработке процедур клеевых ремонтов. Для получения картины деградации упругих свойств углепластика, предполагаемого к использованию при производстве клеевых ремонтных заплат, в данной работе исследовалось изменение модулей продольной и поперечной упругости углепластикового образца под действием циклической нагрузки при температурах -60 , $+23$, $+80$ °С и изменение коэффициента Пуассона под действием циклической нагрузки при тех же температурах. Деградация модулей упругости оценивалась по отношению к модулю упругости на первом цикле нагружения при указанных значениях температуры.

Исследования проводились на сервогидравлической установке с применением климатической камеры. Каждый образец для испытания на усталость подвергался циклической растягивающей нагрузке с коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$. Амплитуда растягивающей нагрузки задавалась как 67% от средней разрушающей нагрузки для данных образцов при заданной температуре. Данные по деформации образцов поступали от наклеенных на образцы тензодатчиков, определявших продольную и поперечную деформацию образцов при приложении растягивающей нагрузки. При каждом значении температуры испытывалась серия из десяти образцов. Общая процедура испытаний соответствовала стандартам ASTM D3039/D3479. Параметры образца для испытаний показаны на рисунке 2.

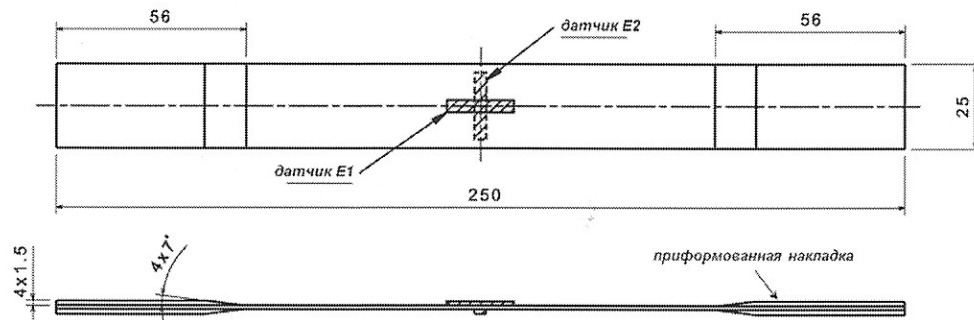


Рисунок 2. Общий вид образцов для усталостных испытаний

Образцы для испытаний были выполнены из углеткани ЕСС 450 полотняного плетения и эпоксидной смолы СНS Ероху 520 в качестве связующего. Образцы для усталостных испытаний представляли собой плоские пластины, содержащие шесть слоев углеткани с укладкой $[0/90]_6$ с приформованными накладками для зажима в испытательной машине.

После статистической обработки данных по величинам деформаций при трех температурах были получены аналитические зависимости, удовлетворяющие результатам испытаний. Все три серии испытаний показали быстрое возрастание продольных деформаций на начальном участке нагружения в пределах 500 циклов и более пологое изменение величины деформации в течение остального времени испытаний. С наименьшей дисперсией результаты испытаний аппроксимируются зависимостью вида:

$$E_1(N) = E_1^{500} + (E_1^1 - E_1^{500})k^{-N} \text{ при } 1 \leq N < 500 ;$$

$$E_1(N) = E_1^{500} + k_1N + k_2N^2 \text{ при } N \geq 500 ,$$

где N – число циклов нагружения; E_1^1 – средний модуль продольной упругости на первом цикле нагружения; E_1^{500} – средний модуль продольной упругости на 500-м цикле нагружения; k, k_i – эмпирические параметры зависимости. Величины параметров аппроксимирующей зависимости приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры аппроксимирующей зависимости $E_1(N)$

	-60°C	+23°C	+80°C
$1 \leq N < 500$			
E_1^1 , ГПа	110.223	106.594	53.402
E_1^{500} , ГПа	74.016	70.841	42.508
k	1.056	1.033	1.014
$N \geq 500$			
k_1	$6.965 \cdot 10^{-7}$	$-4.416 \cdot 10^{-7}$	$-1.458 \cdot 10^{-4}$
k_2	$-6.965 \cdot 10^{-10}$	$3.382 \cdot 10^{-10}$	$7.940 \cdot 10^{-10}$

Графики аппроксимирующих зависимостей, построенные по данным таблицы, приведенные к значению модуля упругости на первом цикле нагружения E_1^1 , показаны на рисунке 3 (график в рамке на врезке демонстрирует изменение модулей упругости на начальном этапе нагружения – в интервале от 0 до 500 циклов).

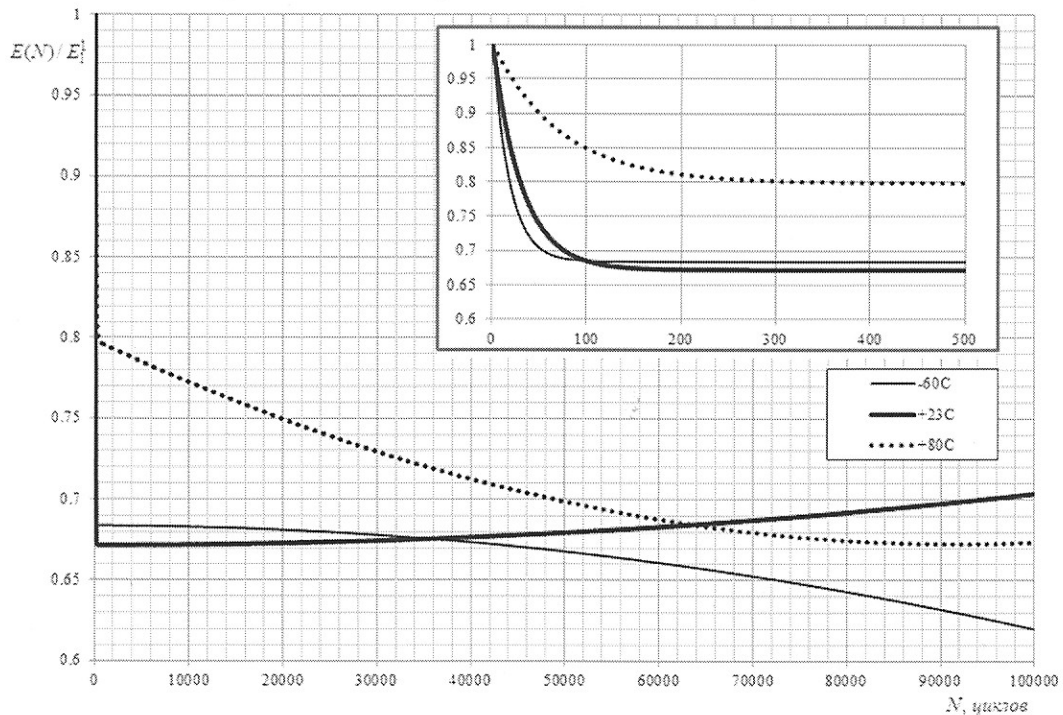


Рисунок 3. Зависимость продольного модуля упругости от числа циклов нагрузки

Изменение поперечного модуля упругости образцов оценивалось по изменению коэффициента Пуассона от числа циклов нагружения. Изменение коэффициента Пуассона удовлетворительно аппроксимируется линейной зависимостью:

$$\nu_{12}(N) = \nu_{12}^1 + \frac{\nu_{12}^{final} - \nu_{12}^1}{10^5} \cdot N,$$

где ν_{12}^1 – коэффициент Пуассона на первом цикле нагружения, ν_{12}^{final} – коэффициент Пуассона на финальном, 10^5 -ом, цикле нагружения.

По результатам проведения усталостных испытаний серии образцов из углепластика на базе углеткани ECC 450 были получены зависимости изменения модуля упругости материала от числа циклов нагружения при трех значениях температуры.

Во всех трех сериях (при температурах -60°C , $+23^{\circ}\text{C}$, $+80^{\circ}\text{C}$) образцы продемонстрировали ожидаемое резкое снижение модуля продольной упругости на интервале до 500 циклов с последующей стабилизацией (положим изменением) модуля упругости до конца проведения испытаний.

При анализе характера поведения коэффициента Пуассона отмечается более значительное его изменение в ходе испытаний при повышенной температуре, что говорит о росте величины поперечной деформации, опережающем рост продольной деформации образцов. Изменение коэффициента Пуассона при пониженной и комнатной температуре выражено менее ярко.

Полученные данные по изменению модуля упругости и коэффициента Пуассона могут использоваться для расчета качества проведения клеевого ремонта композитными заплатами, выполненными из исследованного материала, и оценки срока их эффективной работы.

В четвертом разделе на основании моделей поведения материалов, описанных в разделах 2 и 3, построен общий алгоритм расчета параметров клеевого ремонта и разработана методика подбора подходящих ремонтных заплат из композиционных материалов.

Блок-схема расчетного алгоритма приведена на рисунке 4. Критерием качества ремонтного соединения выбрана скорость развития существующего в обшивке дефекта. На основании проведенных расчетов и по итогам анализа литературы по тематике клеевых ремонтов, в качестве оптимальных автором предлагаются следующие диапазоны конструктивных параметров ремонтной заплаты:

- начальный размер заплаты в направлении поперек трещины A предлагается определять из соотношения (a_0 – исходная длина трещины):

$$A = a_0 + \sqrt{a_0};$$

- форма заплаты – эллиптическая с соотношением полуосей эллипса A/B :

$$0.5 < A/B < 2;$$

- поскольку для ремонта применяются разнородные материалы, оценка напряжения и деформации от изменения температуры среды является обязательной:

$$\sigma_{22}^T = \frac{E_S}{1-\nu_S^2} (\nu_S \varepsilon_{11}^{T,p} + \varepsilon_{22}^{T,p});$$

$$\varepsilon_{11}^{T,p} = \alpha_S \left(\frac{\alpha_{11}^p}{\alpha_S} - 1 \right) \Delta T,$$

$$\varepsilon_{22}^{T,p} = \alpha_S \left(\frac{\alpha_{22}^p}{\alpha_S} - 1 \right) \Delta T.$$

(σ_{22}^T – напряжения от изменения температуры в направлении, перпендикулярном трещине, E_S , ν_S – модуль упругости и коэффициент Пуассона обшивки, α_S – коэффициент линейного температурного расширения материала обшивки, отношения α_{ij}^p / α_S задаются на основании данных о разности между коэффициентом расширения поврежденной обшивки и предполагаемого материала заплаты, ΔT – диапазон температур эксплуатации конструкции).

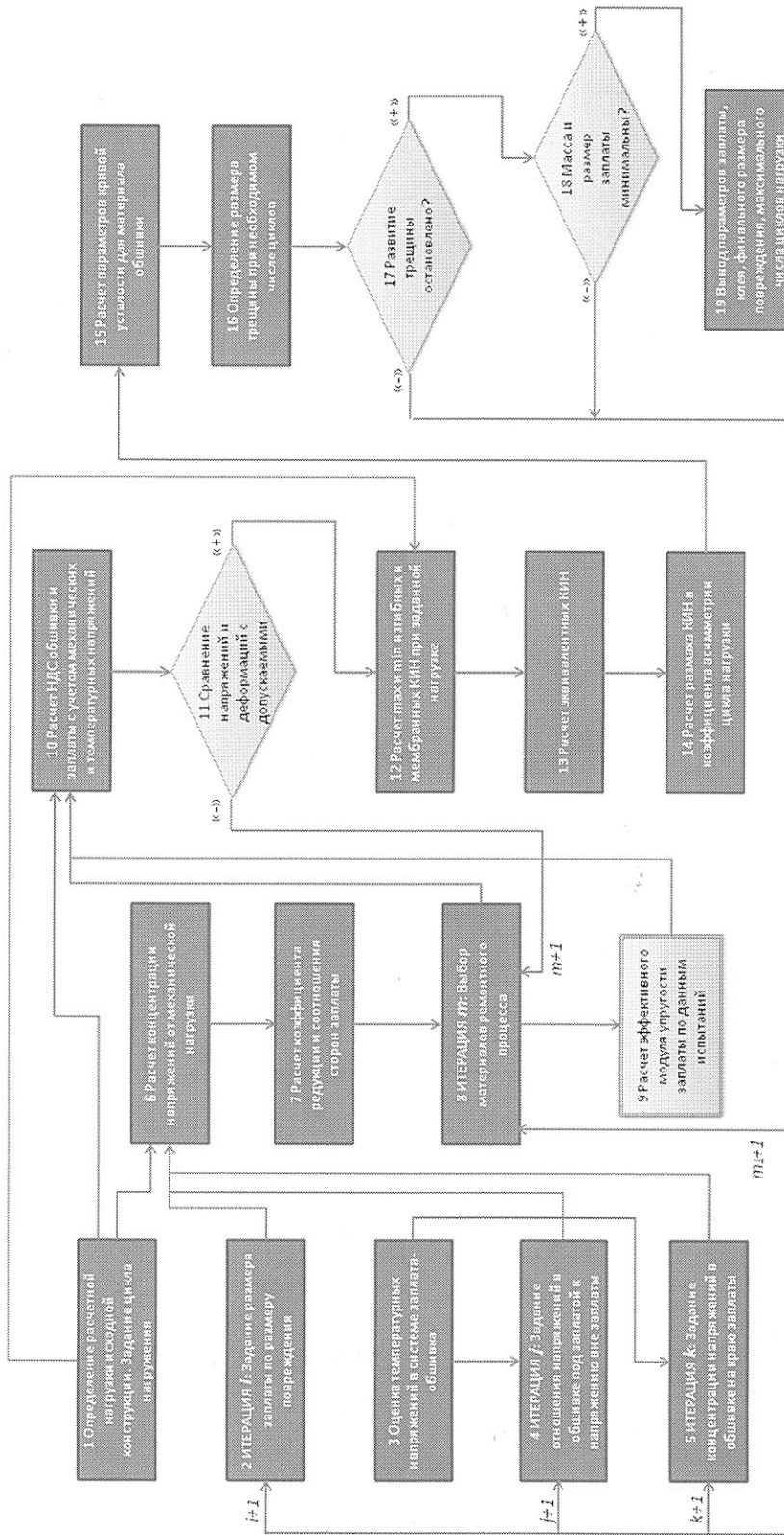


Рисунок 4. Блок-схема расчета клевого ремонтного соединения

- концентрацию напряжений K_0 в обшивке от действия заплаты в зависимости от соотношения $\sigma_{22}^T / \sigma_\infty$ (σ_∞ - напряжение в обшивке вдали от ремонта) можно задавать в диапазоне:
 - при $\sigma_{22}^T / \sigma_\infty \leq 1$: $0.33 + 0.67 \frac{\sigma_{22}^T}{\sigma_\infty} < K_0 \leq 0.8 + 0.2 \frac{\sigma_{22}^T}{\sigma_\infty}$;
 - при $\sigma_{22}^T / \sigma_\infty > 1$: $0.8 + 0.2 \frac{\sigma_{22}^T}{\sigma_\infty} \leq K_0 < 0.33 + 0.67 \frac{\sigma_{22}^T}{\sigma_\infty}$.
- концентрацию напряжений K_t в обшивке на краю заплаты в зависимости от соотношения $\sigma_{22}^T / \sigma_\infty$ можно задавать в диапазоне:
 - при $\sigma_{22}^T / \sigma_\infty \leq 1$: $1.05 - 0.05 \frac{\sigma_{22}^T}{\sigma_\infty} < K_t \leq \min \left\{ 1.3, \frac{\sigma_{в\ растяж}}{\sigma_\infty}, 2 - \frac{\sigma_{22}^T}{\sigma_\infty} \right\}$;
 - при $\sigma_{22}^T / \sigma_\infty > 1$: $\max \left\{ 2 - \frac{\sigma_{22}^T}{\sigma_\infty}, -\frac{\sigma_{в\ сжат}}{\sigma_\infty} \right\} < K_t \leq 1.05 - 0.05 \frac{\sigma_{22}^T}{\sigma_\infty}$
 ($\sigma_{в\ растяж}$, $\sigma_{в\ сжат}$ - пределы прочности на растяжение и сжатие материала обшивки).
- для заплаты в общем случае автором предлагается выбирать материал с большим, чем у ремонтируемой обшивки, модулем продольной упругости; при использовании слоистых пластиков следует выбирать сбалансированную симметричную укладку слоев; направление основы слоев следует ориентировать поперек трещины;
- при выборе клеевого состава, кроме механических свойств клея, автор предлагает принимать во внимание условия эксплуатации соединения, температуру, давление прижима и время отверждения клея, адгезию к материалу обшивки и заплаты. В дополнение к перечисленным свойствам, при оценке клеевого соединения следует обратить внимание на величины отрывных напряжений в клеевом слое, на вероятность возникновения пустот и непроклеев в соединении (и способы снижения этой вероятности), а также на зависимость свойств клея от температуры эксплуатации ремонтного соединения.

Для численной верификации полученной аналитической модели клеевого ремонта автором была построена конечно-элементная (КЭ) модель клеевого ремонта в среде инженерных расчетов Abaqus.

Численная модель ремонта состоит из модели обшивки, содержащей трещину исходной длины, и модели заплаты, выполненной из композиционного материала. Передача усилия клеевой прослойкой между обшивкой и заплатой моделируется заданием условий контакта двух деталей по сопрягаемым поверхностям. Характер роста трещины определялся размахом коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины ΔK – разницей между КИН при максимальном и минимальном уровне механического воздействия за 1 цикл нагружения.

Для моделирования процесса развития дефекта при циклической нагрузке применялись расчетные методы Abaqus: XFEM и Direct Cyclic Approach.

Метод XFEM (Extended finite element method) применяется для моделирования разрывов сплошности материала (трещин) и позволяет искать решения уравнений в частных производных для разрывных функций. Метод прямого циклического нагружения (Direct Cyclic Approach) позволяет построить модель усталостного поведения конструкции, эффективную с точки зрения времени вычислений и потребных ресурсов.

Метод использует разложение в ряд Фурье и интегрирование по времени нелинейного поведения материала для получения стабилизированного отклика конструкции в дискретных точках истории нагружения.

На рисунке 6 приводится сравнение результатов расчета по построенной численной модели клеевого ремонта с результатами вычислений по аналитической модели, алгоритм которой показан на рисунке 4 (a – длина трещины, N – число циклов приложенной нагрузки). В качестве материала заплаты использован углепластик, усталостные свойства которого подвергались исследованию в разделе 3. Вычисления по аналитической и численной модели выполнены с учетом деградации свойств материала заплаты. Свойства клеевого состава соответствуют свойствам клея на эпоксидной основе FM-73 и взяты из данных, опубликованных разработчиком клеевой композиции.

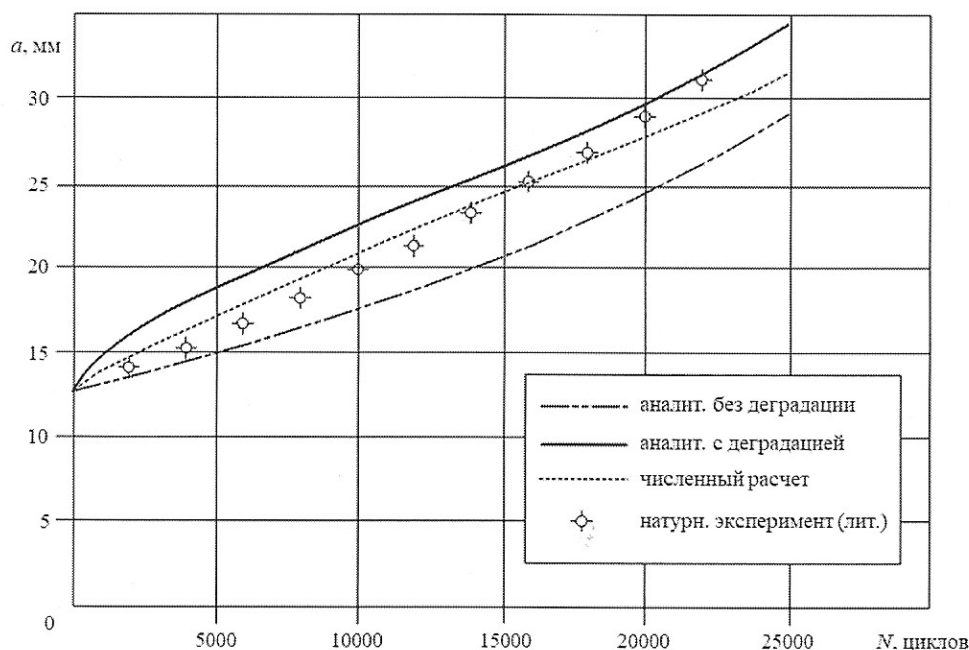


Рисунок 6. Сравнение результатов расчета по численной и аналитической моделям клеевого ремонта

Из приведенного графика следует, что аналитическое решение задачи клеевого ремонта удовлетворительно соотносится с результатами численного расчета модели с теми же геометрическими и механическими параметрами. Выполненное автором включение в аналитическую модель характеристики деградации модуля упругости материала заплаты является целесообразным, т.к. позволяет учитывать в расчете изменение жесткости заплаты при циклической нагрузке, дает возможность корректно прогнозировать характер развития дефекта и приводит к небольшой (в пределах 10%) переоценке размера дефекта, что выгодно с точки зрения назначения периодичности инспекций осуществленного ремонта: осмотр места повреждения будет проведен раньше, чем длина трещины превысит установленное критическое значение. Указанная величина рассогласования следует из сравнения результатов аналитического и численного расчетов с данными натурного эксперимента.

При условии применения в качестве материала заплаты углепластика ECC 450/CHS Ероху 520, усталостные исследования которого описаны в разделе 3, характер развития дефекта будет существенно зависеть от температуры работы ремонтного соединения (рисунок 7).

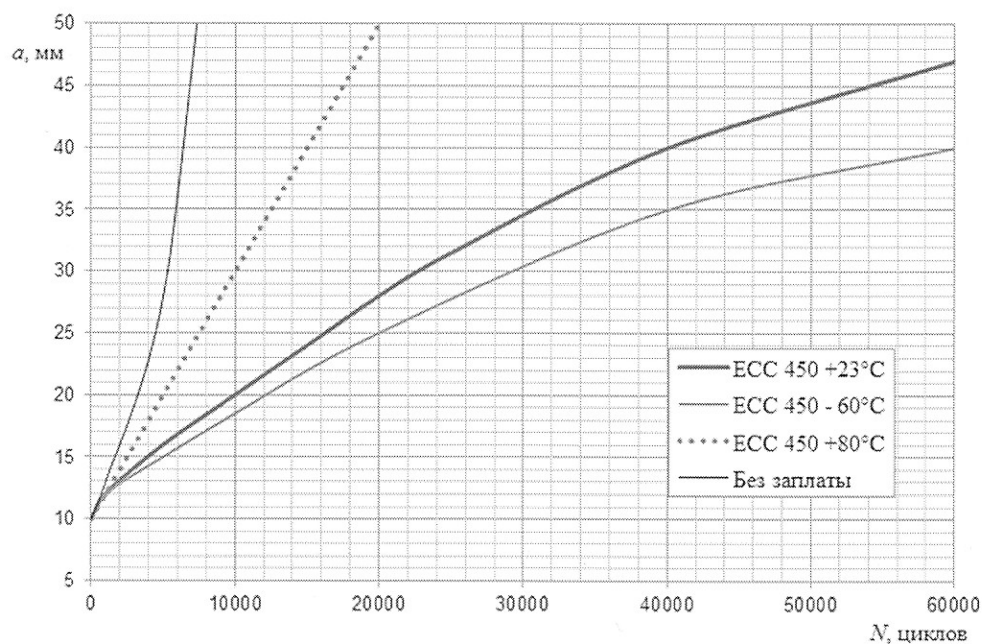


Рисунок 7. Сравнение качества ремонта для углепластика ECC 450/ CHS Ероху 520 при разных температурах

При температуре +80°C ремонтная заплата практически не препятствует развитию дефекта в материале обшивки; данный материал не может применяться в качестве ремонтного для конструкций, несущих свою основную нагрузку при повышенных температурах. Наблюдается интенсивный рост трещины на начальном этапе нагружения. Таким образом, деградация упругих свойств материала будет являться существенным фактором, влияющим на развитие дефекта в материале обшивки и сказывающимся на прогнозе требуемых интервалов инспекции места проведенного ремонта.

На рисунке 8 построены графики зависимости размера трещины от числа циклов нагрузки $a = f(N)$ для обшивки, выполненной из алюминиевого сплава, и композитных заплат с квазиизотропной укладкой, выполненных из угле-, стекло- и боропластика с эпоксидным связующим, а также из гибридного металл-полимерного материала GLARE 2-3/2-0.2 (0/0). Клеевым составом выбран клей Сутес FM-73. Механические свойства материалов взяты из открытых источников.

Результаты расчета клеевого ремонтного соединения, построенного на основе вычислительных моделей, описанных в разделе 2, и использующего данные натурального эксперимента раздела 3 сравнивались с данными аналогичного натурального эксперимента и с данными конечно-элементного моделирования. Отмеченное удовлетворительное совпадение результатов расчета, данных эксперимента и результатов моделирования хотя и приводит к переоценке скорости развития дефекта в ремонтируемой конструкции, но позволяет установить безопасные (более частые) интервалы инспекций отремонтированной конструкции.

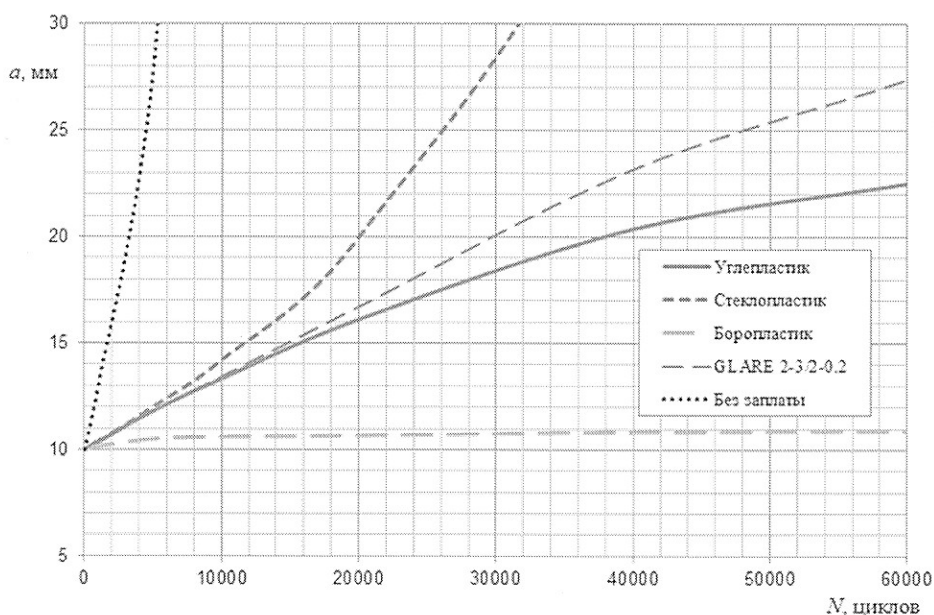


Рисунок 8. Сравнение качества ремонта для разных материалов заплата

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена научная проблема создания метода аналитического расчета клеевых соединений для металлических авиационных конструкций. Для решения данной проблемы автор выполнил следующие исследования.

1. На основе проведенного анализа существующих технологий клеевых ремонтов сделано заключение о принципиальной реализуемости процедур установки ремонтных заплата на поврежденные металлические конструкции планера современного воздушного судна, находящегося в коммерческой эксплуатации. На современном этапе развития конструкционных и ремонтных материалов и технологий возможно провести ремонтные операции с применением клеевых составов в соответствии с утвержденной документацией к воздушному судну силами технического персонала со средним уровнем квалификации в условиях конструктивно-технологических и климатических ограничений.

2. Проведена серия экспериментальных исследований усталостной деградации механических свойств композиционного материала (углепластик ECC 450/CHS Ероху 520).

3. Построена модель изменения упругих свойств углепластика ECC 450/CHS Ероху 520 под действием циклической нагрузки и при различных значениях температуры окружающей среды.

4. Проведена оценка влияния деградации упругих свойств материала ремонтной заплата на качество проведенного клеевого ремонта.

5. Разработана методика аналитического расчета клеевых ремонтных соединений, позволяющая проводить предварительную оценку качества решений по установке клеевых ремонтных заплата на поврежденные металлические конструкции планера летательного аппарата.

6. Предложена методология ускоренного конечно-элементного расчета клеевого ремонтного соединения под действием циклического нагружения.

7. На основании сравнения результатов расчета по аналитической модели клеевого ремонтного соединения с результатами численного конечно-элементного расчета сделан вывод о достоверности и корректности предлагаемой методики расчета.

Полученные результаты позволяют использовать предлагаемую методику при расчете и анализе ограничений применимости клеевых ремонтов, предлагаемых к установке, в организациях, занимающихся проектированием и производством воздушных судов гражданского назначения, а также осуществляющих их коммерческую эксплуатацию.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций

1. Федотов А.А., Ципенко А.В. Аналитическая модель клеевого ремонта повреждений обшивки летательного аппарата с учетом деградации свойств материала // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. Т. 19. № 6. С. 118-126.
2. Федотов А.А., Ципенко А.В., Лебедев А.И. Численное моделирование клеевого ремонтного соединения // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21. № 3. С. 125-138.
3. Федотов А.А., Ципенко А.В. Экспериментальное исследование усталостной деградации модуля упругости углепластика при различных температурах // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2019. № 1. С. 15-21.

Научные публикации в других изданиях:

1. Федотов А.А. Моделирование клеевого ремонта эксплуатационных повреждений авиационных конструкций. В книге: XLIII ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ международная молодежная научная конференция. Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. 2017. С. 81-82.
2. Федотов А.А., Ципенко А.В. Анализ влияния деградации свойств ремонтной заплаты на развитие эксплуатационных повреждений авиационных конструкций. В сборнике: Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2017) 2017. С. 761-762.
3. Федотов А.А., Ципенко А.В. Моделирование клеевого ремонта эксплуатационных повреждений авиационных конструкций. В книге: Гагаринские чтения 2017 Тезисы докладов. 2017. С. 366-367.
4. A. A. Fedotov, A. V. Tsipenko. Durability Evaluation of Bonded Repairs for the Damaged Metallic Structures Subjected to Mechanical and Thermal Loads. / L. C. Jain et al. (eds.), Advances in Theory and Practice of Computational Mechanics, Smart Innovation, Systems and Technologies 173. – Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020. – pp. 239-255.

Соискатель

Федотов А.А.