

В диссертационный совет
Д 223.011.01 по техническим наукам
при Московском государственном
техническом университете
гражданской авиации (МГТУ ГА)
(125993, г. Москва, Кронштадтский
бульвар, д. 20)

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

к.т.н. Михайловского Константина Валерьевича

на диссертационную работу

ФЕДОТОВА АЛЕКСЕЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА

на тему «Методика восстановления элементов авиационных конструкций с эксплуатационными повреждениями с помощью клеевых соединений», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

Актуальность темы. В соответствии с программой «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы» важной задачей считается создание надежных элементов авиационных конструкций. С учетом условий эксплуатации современных авиалайнеров элементы конструкции подвергаются воздействию аэродинамических нагрузок, знакопеременных температур, вибраций, климатических факторов, локальных ударов, что сказывается на ресурсе. Из-за экономической целесообразности крайне остро стоит вопрос продления эксплуатационного ресурса современных авиалайнеров. Одним из вариантов рассматривается возможность локального ремонта с применением специальных усилений (заплаток) на основе композиционных материалов и клеев, после проведения неразрушающего контроля и оценки степени опасности дефекта или трещины. Исследованием включений, дефектов в виде трещин в изотропных и анизотропных материалах занимались на протяжении около 100 лет, начиная с работ А.А. Гриффитса,

Дж.Р. Ирвина, Дж.Д. Эшелби и многих других, что позволило создать основы механики разрушения и математические зависимости. В связи с чем, актуален замысел диссертационной работы, который направлен на создание расчетного алгоритма и методики для оценки работоспособности локального ремонта с применением специальных усилений на основе композиционных материалов и клеев на поврежденном элементе из алюминиевых сплавов. Разработка методики опирается на аналитические зависимости механики сплошной среды, в том числе с включениями, механики разрушения и экспериментальные исследования характеристик углепластика при циклических нагрузках и разной температуре.

Цель работы: разработать метод аналитического расчета клеевых ремонтных соединений, чтобы получить удобную методику оценки качества решений, принимаемых при создании эксплуатационной документации.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **основные задачи:**

- проанализированы доступные эксплуатантам авиационной техники технологии клеевых ремонтов и области их возможного применения при ремонте эксплуатационных повреждений металлических авиационных конструкций;

- проведены экспериментальные исследования усталостной прочности образцов из композиционного материала при различных значениях температуры испытаний;

- обоснована необходимость учета деградации механических свойств заплата при расчете клеевых ремонтных соединений;

- разработана методика аналитического расчета клеевых ремонтных соединений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в: результатах экспериментальных исследований усталостной прочности и деградации механических свойств образцов из полимерного композиционного материала (углепластика) при разных температурах; аналитической модели клеевого

ремонта металлических конструкций композитными заплатами; методе учета данных по деградации механических свойств материала ремонтной заплаты под действием циклической нагрузки при расчете клеевых ремонтных соединений.

Практическая значимость работы состоит в методике аналитического расчета клеевых ремонтных соединений с учетом данных по деградации механических свойств материала ремонтной заплаты под действием циклической нагрузки, которая может применяться в научно-исследовательских институтах гражданской авиации и опытно-конструкторских бюро при разработке эксплуатационной документации воздушных судов гражданской авиации, в организациях при проведении ремонтных работ и продлении эксплуатационного ресурса.

Оценка содержания диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы.

В введении показана актуальность темы работы, сформулирована цель и задачи, приведена новизна и практическая значимость, изложены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе рассмотрены существующие требования к возможному ремонту элементов конструкций современных авиалайнеров и проанализированы методы ремонта. Показаны преимущества локального ремонта с помощью применения заплаток на основе композиционных материалов. В разделе приведены технологические особенности установки клеевых заплаток на основе композиционных материалов и указаны ограничения области их применения по температуре и кривизне ремонтируемой конструкции. Обобщены данные по особенностям расчета клеевых ремонтных соединений с применением заплаток на основе композиционных материалов.

Второй раздел посвящен разработке математической модели определения напряженно-деформированного состояния заплаток на основе

композиционных материалов при ремонте металлических конструкций авиалайнеров. В качестве допущений считалось, что на плоскую обшивку прикреплена эллиптическая заплатка, а линейные размеры обшивки достаточно велики для того, чтобы пренебречь краевыми эффектами. Под серединой заплатки на основе композиционного материала задана геометрическая модель трещины в ремонтируемой конструкции из алюминиевого сплава. Алгоритм расчета напряжений и деформаций применялся из опубликованных работ и включал следующие стадии: на первом этапе рассматривалось влияние локальной заплатки на изменение исходного напряженно-деформированного состояния обшивки без учета дефекта при допущении, что заплатка прикреплена к обшивке без возможного отслоения; на втором этапе производилась оценка напряжений в клеевом слое при передаче деформаций от обшивки к заплатке; на третьем этапе определялись коэффициенты концентраций напряжений в кончике трещины от приложенной растягивающей нагрузки, определенной этапами ранее.

Расчет напряжений в клеевом слое оценивался по методу Харта-Смита, который включал в себя следующие стадии: определение величин изгибающих моментов в соединяемых элементах на краях и в сечении с дефектом; определение величин напряжений в клеевом слое, вызываемых изгибом соединения; установление касательных напряжений в клеевом слое при передаче нагрузки.

Для определения вклада приклеенной заплатки в изменение напряжений обшивки рассчитывались значения характеристик упругости составной пластины, определялись напряжения в составной пластине и вычислялась доля напряжений, приходящихся на обшивку. В приведенных моделях уточнялось, что продольный модуль упругости рассматривался как переменная величина, зависящая от количества циклов нагружения.

В третьем разделе рассматривались различные модели для оценки усталостной прочности композиционных материалов. Показаны современные подходы к исследованию деградации прочностных и жесткостных

характеристик анизотропных композиционных материалов при действии циклических нагрузок.

С использованием испытательной установки ITW BiSS с климатической камерой осуществлялись испытания образцов углепластика на основе углеродной ткани ECC 450 полотняного плетения и эпоксидного связующего CHS Epoxy 520. Образцы для усталостных испытаний представляли собой плоские пластины, содержащие 6 слоев углеродной ткани и приклеенными накладками для зажима в захватах испытательной установке. 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 измерялись с помощью тензодатчиков, наклеенных в центре, определявших продольную и поперечную деформацию при приложении растягивающей нагрузки. Испытания проводились при трех значениях температуры: -60°C , $+23^{\circ}\text{C}$, $+80^{\circ}\text{C}$. Испытания выполнены в соответствии со стандартами ASTM D3039/D3479 и определялись значения модулей упругости в продольном и поперечном направлении под действием циклической нагрузки при выбранных температурах, которые соответствовали типовым условиям эксплуатации элементов обшивки авиалайнера. Полученные данные по изменению модуля упругости и коэффициента Пуассона могут использоваться для расчета заплатки при клеевом ремонте элемента конструкции авиалайнера.

В четвертом разделе приведена методика расчета параметров заплаток на основе композиционных материалов при клеевом ремонте металлических конструкций авиалайнера. Показана блок-схема расчетного алгоритма, который учитывает: особенности нагружения; размеры заплатки на основе композиционного материала и клея; физико-механические характеристики композиционного материала заплатки; зависимость продольного и поперечного модуля упругости материала заплатки от количества циклов

нагружения; возможность появления концентраторов напряжений, обусловленных наличием трещины в ремонтируемой обшивке из алюминиевого сплава; величины коэффициентов концентраций напряжений.

Результаты, полученные с использованием аналитических зависимостей, сопоставлялись с данными на основе численного моделирования в коммерческом программном продукте конечно-элементного анализа Abaqus. Конечно-элементная модель состояла из обшивки, содержащей трещину исходной длины, заплатки на основе композиционного материала и зоны контакта, где использовались контактные конечные элементы. Для моделирования процесса развития трещины при циклической нагрузке применялись расчетные методы программы Abaqus: XFEM и Direct Cyclic Approach.

Для сравнения вариантов клеевого ремонта расчет проведен для заплат из: углепластика, стеклопластика, боропластика и гибридного материала. Показано, что единственным материалом из использованных в сравнении, остановившим рост трещины, оказался боропластик.

Замечания по диссертационной работе.

1. В диссертационной работе содержатся отдельные неточности и опечатки: на странице 8 необходимо было задачи указать как «...проанализированы...», «...проведены...», «...обоснованы...», а не «...проанализировать...» и т.д.; на странице 34 указано « z_i », а необходимо было указать « z_k »; на странице 47 и далее по тексту вместо термина «инклюзия» желательнее применять термин «включение»; на странице 58 в зависимости для определения усилия при действии температуры; на странице 68 и далее по тексту желательнее не применять термин «берега» трещины; на странице 73 в формуле по определению модуля упругости клеевого слоя; на странице 138 указано, что характеристики углепластика приведены в таблице 3.1, однако там показаны свойства углеродной ткани и нити; на странице 141 в таблице 4.4 при существующей анизотропии характеристик жесткости у стеклопластика и боропластика нет анизотропии по термическим

коэффициентам линейного расширения (ТКЛР) – значения одинаковые, а квазиизотропный по модулям упругости углепластик имеет анизотропию ТКЛР.

2. Для расчета коэффициентов концентраций напряжений на кончике трещины в ремонтируемой обшивке из алюминиевого сплава используются зависимости для хрупких материалов и не рассматриваются возможные эффекты пластичности.

3. При определении температурных напряжений в заплатке при клеевом ремонте не учитывается возможное тепловыделение при отверждении полимерного связующего.

4. Степень дискретизации сетки конечных элементов для ремонтируемой обшивки в один элемент по толщине может привести к неточностям в определении напряженно-деформируемого состояния.

5. Расчеты показали, что наилучший результат по ремонту алюминиевых обшивок авиалайнеров с трещиной обеспечивает боропластик, однако не рассмотрены современные высокомодульные углепластики, которые обладают большими жесткостными и прочностными характеристиками.

Сделанные замечания не снижают уровень работы, которая отвечает современным требованиям к диссертации на соискания ученой степени кандидата технических наук.

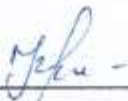
Заключение

Диссертация, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и паспорту специальности 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта. Автореферат отражает основные этапы и результаты диссертационной работы. По тематике диссертационной работы опубликовано 7 научных работ, 3 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК.

Диссертационная работа на тему «Методика восстановления элементов авиационных конструкций с эксплуатационными повреждениями с помощью клеевых соединений» является законченной научно квалификационной работой, а ее автор – Федотов Алексей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта.

Официальный оппонент

кандидат технических наук (по специальности 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов), доцент кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

 Михайловский Константин Валерьевич
« 5 » 03 2022 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1

Тел.: 8-499-263-65-14, e-mail: mikhaylovskiy@bmstu.ru

Подпись и должность Михайловского Константина Валерьевича заверяю:




А.Г. МАТВЕЕВ

ЗАМ. НАЧ УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ТЕЛ: 8499-263-67-69