

В диссертационный совет 24.2.327.09  
на базе ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»  
(125993, г. Москва, Волоколамское  
шоссе, д. 4)

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

к.т.н. Михайловского Константина Валерьевича

на диссертационную работу

Маскайкиной Анны Александровны

на тему «Разработка методов расчета стыковых металло-композитных узлов авиационных конструкций на прочность с учетом ресурса», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

**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, вертолетов элементы конструкции подвергаются воздействию аэродинамических нагрузок, знакопеременных температур, вибраций, климатических факторов, локальных ударов, что сказывается на ресурсе. Для повышения весовой эффективности в конструкциях авиалайнеров, вертолетов в течение более чем 40 лет широко применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ). ПКМ, в частности углепластики, обладают высокими физико-механическими необходимыми теплофизическими и химическими характеристиками. Одной из важных задач при создании авиалайнеров, вертолетов с элементами конструкций из ПКМ считается выбор рациональных вариантов их соединений с металлическими конструкциями для достижения необходимой прочности и надежности. На основе вышесказанного, диссертационная работа посвящена актуальной теме в области разработки методов расчета узлов соединения деталей из металлов с деталями из ПКМ.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«28» 04 2023»

**Цель работы:** Разработка методов расчета стыковых металло-композитных узлов авиационных конструкций на прочность с учетом ресурса. Получение алгоритма расчета накоплений повреждений, влияющих на прочностные характеристики металло-композитных узлов в авиационных конструкциях, который позволит обеспечить надежность и ресурс работы конструкции.

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

- предложена оптимальная длина стыка соединения, в котором обеспечено равномерное распределение нагрузки по длине металло-композитного стыка в соединительных болтах;

- проведен выбор зоны болтового соединения на примере несущего винта лопасти вертолёта и стыка крыла с центропланом;

- осуществлен расчет усталостной долговечности материалов вертолетной лопасти и крепежных болтов;

- проведено моделирование деградации свойств однонаправленных, слоистых композитов и прогнозирование изменения их характеристик с ростом поврежденности при циклическом нагружении;

- исследована несущая способность конструкции и проведены экспериментальные исследования соединений.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в уточненном расчетном алгоритме для получения оптимальной длины стыка соединения, в котором обеспечено равномерное распределение нагрузки по длине стыка в соединительных болтах и методики расчета накопления повреждений в зонах стыка авиационных конструкций на примере стыка крыла центроплана и крепления лопасти вертолета.

**Практическая значимость** работы состоит в оценке несущей способности зоны стыка авиационных конструкций для прогнозирования их ресурса.

**Оценка содержания диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений с результатами испытаний и актом внедрения. Работа изложена на 155 страницах, включая 102 рисунка, 20 таблиц, 114 наименований литературных источников.

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

**В первой главе** рассмотрены особенности накопления повреждения в авиационных конструкциях из композиционных материалов. Изучены работы, посвященные экспериментальным исследованиям и математическому моделированию болтовых соединений с использованием численных методов и программных комплексов.

**Вторая глава** посвящена методике выбора рациональной длины металло-композитного стыка соединения, в котором обеспечено равномерное распределение нагрузки. На примерах крепления лопасти несущего винта к металлическому переходному устройству и стыка крыла с центропланом показано применение данной методики и получение оптимальной длины стыка. Приведены аналитические зависимости и рассмотрены несколько вариантов диаметров болтов. Результаты расчета сопоставлены с данными численного моделирования с использованием метода конечных элементов и реализации его в оболочке MSC.Patran с решателем MSC.Nastran. Результаты расчета показали, что болты диаметром 8 мм и 30 мм выдерживают статическую нагрузку, также болты диаметром 8 мм обеспечивают равномерное перераспределение нагрузки по длине стык.

**В третьей главе** приведена методика расчета накопления повреждений в зонах стыка авиационных конструкциях на примере стыков крыла центроплана и крепления лопасти вертолета. При рассмотрении процесса накопления повреждений использовалась уточненная методика микромеханической модели для нахождения количества повреждений в

процессе циклического нагружения конструкции. Получены изменения модуля упругости и модуля сдвига для узлов стыка авиационных конструкций. При моделировании роста повреждений в ПКМ вводились следующие допущения: не учитывались процессы зарождения и роста микротрещин в волокнах и матрице, а также их структурные особенности; для каждого монослоя применялась модель деградации свойств материала, которая связана с накоплением повреждений.

В **четвёртой главе** представлены результаты расчета ресурса авиационных конструкций с учетом кривой усталостной долговечности. Предложен алгоритм оценки несущей способности конструкции из ПКМ с учетом роста поврежденности, который дает прогноз длительности работы конструкции без нарушения эксплуатационных свойств. Алгоритм апробирован для вертолетной лопасти реальной и предлагаемой конструкции, а также приведен график изменения предельной нагрузки вследствие поврежденности материала. Представлены результаты численного моделирования с использованием оболочки MSC.Patran с решателем MSC.Nastran. Расчет вертолетной лопасти показал, что лопасть с болтами диаметром 8 мм имеет ресурс больший, чем лопасть с болтами диаметром 30 мм за счет уменьшения нагрузки каждого болта на материал лопасти.

В **пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований образцов углепластиков и соединений с крепежными элементами. Показаны данные статических и циклических испытаний. На основе анализа испытаний получены зависимости модуля упругости от числа циклов нагружения. Определенный интерес представляют особенности полей перемещений и деформаций в образцах соединений при статических испытаниях, которые получены методом корреляции цифровых изображений на поверхности.

В **заключении** сформулированы и изложены основные результаты диссертационной работы.

Автореферат отражает основные этапы и результаты диссертационной работы. По тематике диссертационной работы опубликовано 10 научных работ, 4 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК РФ и 1 статья в материалах конференции, индексируемых базой данных Scopus.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. В диссертационной работе содержатся отдельные неточности и опечатки: стр. 38 (таблица 2.1) в значении предела прочности при сжатии стеклопластика на основе ткани Т-25ВМ-78; стр. 51, рисунок 2.18 – размерность шкалы напряжений; стр. 81 – 85, рисунки 4.2 – 4.5 не указана размерность шкалы напряжений.

2. Желательно указывать процентное значение повышения надежности и ресурса исследуемых конструкций в случае применения методики расчета накопления повреждений.

3. В работе не указано, учитывались ли при математическом моделировании соединений моменты затяжки болтов, варьировались ли данные значения, а также проведена ли оценка их влияния на полученные результаты.

4. В результатах численного моделирования с использованием оболочки MSC.Patran и решателя MSC.Nastran не приведены оценки тепловых нагрузок с учетом особенности эксплуатации соединений.

5. В экспериментальных исследованиях получен разброс значений модуля упругости и предела прочности при растяжении углепластика более чем 15%, но по тексту не даны пояснений возможных причин.


Сделанные замечания не снижают уровень работы, которая отвечает современным требованиям к диссертации на соискания ученой степени кандидата технических наук. Диссертационная работа Маскайкиной Анны Александровны по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

## Заключение

В целом диссертационная работа выполнена на высоком уровне, получены новые и практически значимые результаты, которые внедрены в учебный процесс. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 – п.14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и 12.10.2018 № 1168), а ее автор Маскайкина Анна Александровна достойна присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

### 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  
«27» 04 2023 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:

**ВЕРНО**  
Начальник Управления кадрового  
сопровождения и администрирования  
МГТУ им. Н.Э.Баумана  
К.П.Силкина



*С отзывом  
ознакомлена  
28.04.2023*