

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук Разумовского Игоря Александровича
на диссертационную работу Баутина Андрея Александровича на тему: «Метод обнаружения повреждений в авиаконструкциях на основе мониторинга местного напряжённо-деформированного состояния», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Целью диссертационной работы А.А.Баутина является разработка метода анализа целостности типовых узлов авиаконструкций, осуществляемого путём мониторинга местного напряженно-деформированного состояния (НДС), которое изменяется вследствие возникновения и развития усталостных повреждений. При этом для регистрации изменений параметров НДС используется метод электротензометрии.

Очевидно, что указанный подход в принципе открывает возможность обеспечения прочности и надёжности элементов авиаконструкций с учётом их реальной нагруженности и повреждённости и может стать основой для обоснования уменьшения расходов на проведение регламентных работ, связанных с поддержанием лётной годности на основе научно-обоснованных корректировок для всего комплекса мер по оценке целостности планера. Более того, такого рода методики могут быть положены в основу разработки бортовых средств мониторинга состояния, позволяющих проводить анализ оценки возникновения повреждений и проведения соответствующих расчётов на остаточную прочность.

Заметим, что реальные возможности решения рассматриваемой проблемы возможно только на базе комплексного применения разработанных в самые последние годы методов регистрации и обработки значительных объёмов экспериментальной информации о НДС исследуемых объектов в режиме реального времени с применением методов и программ для численного моделирования процессов накопления повреждений и разрушения. Имеющееся в настоящее время в научной и специальной литературе весьма значительное количество научных публикаций в рассматриваемой области только подтверждает актуальность и важность проблематики диссертации, а сложность решения задачи

для каждого конкретного объекта авиатехники выдвигает перед исследователем необходимость решения целого комплекса научных и научно-технических проблем. Указанные обстоятельства позволяют сделать вывод несомненной **актуальности темы диссертационной работы А.А. Баутина.**

Диссертация состоит из Введения, 4-х глав и Заключения.

В **1-й главе** сформулирована концепция обеспечения безопасности при длительной эксплуатации авиаконструкций на основе применения бортовых систем мониторинга (БСМ), который является одним из наиболее перспективных способов обнаружения повреждений и анализа состояния конструкции на основе зарегистрированных данных, как при эксплуатации, так и в условиях лабораторных испытаний. Использование БСМ даёт возможность проводить оценку реального состояния конструкции на основе информации, полученной по фактическим показаниям.

Значительная часть 1-ой главы посвящена аналитическому обзору научных публикаций по теме диссертации. Здесь представлен содержательный (более 80-ти наименований) аналитический обзор исследований по избранной теме, включающий формулировку основных принципов обеспечения безопасности при длительной эксплуатации воздушных судов (ВС), оценку эффективности применяемых в настоящее время обеспечительных мер и, главное, обоснование преимуществ, которых можно достичь при использовании БСМ. Приведены примеры разработки различных тестовых БСМ, датчиков и алгоритмов обработки данных, позволяющих проводить анализ целостности авиационной конструкции. Рассмотрены существующие и перспективные технологии, используемые в системах мониторинга, которые позволяют проводить анализ фактической *нагруженности* отдельных элементов планера или контроль их *целостности*; сформулированы особые требования к датчикам деформаций и системе бортового измерительного комплекса.

Кратко представлены результаты применения в БСМ датчиков измерений деформаций (электротензометрических и волоконно-оптических), акустических и пьезоакустических бортовых систем; кратко говорится о перспективах

применения оптико-цифровых методов для регистрации полей перемещений поверхностей исследуемых объектов.

В случае использования точечных датчиков (тензорезисторов и оптоволоконных датчиков деформации) рассматривается задача определения оптимальной схемы локализации точечных датчиков, обеспечивающая достаточную для корректной оценки ситуации картину повреждённости при минимальном количестве измерительного оборудования. Анализ изменения НДС и уровня повреждённости критических зон при этом выполняется с помощью обработки экспериментально полученной информации с использованием численного моделирования на основе МКЭ по критериям разрушения (как правило, усталостного) ответственных зон конструкции и использования МКЭ на базе различных CAE (Computer-aided engineering) – систем. Указано, что в качестве способов корректной интерпретации данных измерений, в терминах повреждённости целесообразно использовать современные методы машинного обучения.

Проведенный диссертантом анализ позволяет сделать вывод, что в настоящее время создание БСМ для *конструкции в целом* не представляется возможным. В соответствии с этим положением, в выводах по 1-ой главе сформулированы задачи, которые следует решить при создании БСМ для элементов авиаконструкций с многоочаговыми повреждениями типа продольных и поперечных фюзеляжных стыков:

- определить характерные размеры и расположение зон с наиболее интенсивным изменением НДС, позволяющим обнаруживать повреждения с помощью датчиков;
- разработать экспериментально-расчётную методику обнаружения возникающих трещин и анализа процессов накопления повреждений (с учетом заданного уровня остаточной прочности) на основе обработки данных тензометрических измерений.

Глава 2 посвящена исследованием кинетики НДС, возникающего в фюзеляжных стыках среднемагистрального пассажирского самолёта с использованием тензометрии, а также фрактографии.

Изложены результаты испытаний продольных стыков, в которых усталостные повреждения листов обшивки являлись результатом циклической наработки. В результате испытаний показано, что наиболее существенные изменения показаний датчиков (более чем на 10%) могут быть зарегистрированы при наработке равной 80% от полного количества полётных циклов до разрушения. После усталостных испытаний образцов изломы разделённых частей подвергались фрактографическому анализу, в результате которого выявлялись очаги зарождения трещин, скорость роста трещин в различных зонах излома и вид фронтов трещин, соответствующие различному количеству циклов усталостного нагружения. Указанные экспериментальные данные использовались для расчётного определения изменений НДС на основе численного моделирования с применением МКЭ.

Здесь также приводится краткое описание особенностей построения КЭ-сеток, используемых для численного моделирования процесса усталостного повреждения рассматриваемых объектов («трёхрядного двухсрезного соединения»). Указывается, что, при разработке КЭ-моделей учитывались результаты проведенных диссертантом усталостных испытаний.

На основе сопоставления результатов экспериментов и расчётов делается вывод о вполне приемлемом для практики соответствии полученных данных (разница находится в пределах 7-8%).

Замечания по 2-ой главе

- 1 На наш взгляд автору следовало бы чётко пояснить, почему при наличии в настоящее время разнообразных методов и аппаратуры для регистрации параметров НДС в реальном режиме времени (они указаны в диссертации), в работе принято использование именно элетронезометрии.*
- 2 Следовало бы указать технические характеристики (чувствительность, погрешность результатов) используемых тензодатчиков, имеющую*

место при стендовых испытаниях и в условиях эксплуатации, а также сформулировать требования ограничения на разброс величин нагрузок, который всегда имеет место при стендовых испытаниях узлов авиаконструкций.

- 3 Следовало более детально изложить процедуру численного моделирования решаемых задач: используемые ПК, схемы КЭ-разбиения, базовые соотношения, используемые для расчёта параметров трещиностойкости, критериальный подход к оценке условий возникновения усталостных трещин.*

Содержание **главы 3**, по нашему мнению, следует отнести к наиболее значимым научно-методическим достижениям диссертанта.

Автором разработана методика получения оптимальной схемы установки тензодатчиков для мониторинга состояния с учетом расчетного уровня остаточной прочности и технических возможностей тензосистем, обеспечивающих возможность надёжного обнаружения многоочаговых повреждений в фюзеляжных стыках по данным тензометрии. В основе методики лежит формирование функциональных связей между параметрами усталостных повреждений (многоочаговых трещин) и параметрами схемы установки датчиков. Для реализации указанной задачи оптимизации предложено 2 способа: 1-ый основана на использование нейросетевой аппроксимации и последующего решения задачи глобальной оптимизации; 2-ой – применение метода прямого поиска.

В диссертации представлены результаты использования предложенной методики для определения схем установки датчиков для фюзеляжных стыков 2-х видов: 1 - трёхрядного соединения листов внахлёт, подкреплённого стрингером, 2 - четырёхрядного соединения двух листов через дополнительный элемент, подкреплённого силовым набором из двух стрингеров и нервюры. Проведенные расчёты показали, что для своевременного обнаружения многоочаговых трещин достаточно установить 1 датчик на 4 или 5 отверстий (в зависимости от конструкции стыка) вблизи наиболее нагруженного ряда соединения.

Подтверждение эффективности предложенной методики иллюстрируется также результатами экспериментальных исследований образцов поперечного стыка, заключавшегося в анализе параметров возникших в результате усталостных испытаний трещин (дополнительный визуальный контроль был проведен после расклёпки соединений).

Замечания по 3-ей главе

- 4 Следовало бы выполнить оценку влияния на результаты мониторинга погрешностей данных тензоизмерений, а также возможных на практике смещений точек установки тензорезисторов. Такого рода исследования можно было бы выполнить путём численного моделирования соответствующих задач.

Заключительная, 4-ая глава диссертации посвящена разработке рекомендаций для определения пороговых значений параметров НДС (зарегистрированных путём тензоизмерений), по величинам которых, можно сделать надёжные выводы о реальной повреждённости соответствующего узла конструкции.

Диссертантом рассмотрены 2 подхода к оценке пороговых значений изменения локальных деформаций ε_{th} в избранных зонах исследуемых узлов: детерминистический и эмпирический. В 1-ом случае предполагается анализ и учет всех основных факторов, которые могут повлиять на НДС рассматриваемой части конструкции: изменение нагрузок, перераспределение усилий в связях соединениях, влияние температуры, релаксация остаточных напряжений, развитие трещиноподобных повреждений. Определение значения ε_{th} эмпирическим способом выполняется на основе сопоставления результатов тензоизмерений неповреждённой конструкции, с данными, зарегистрированными после усталостных испытаний при различной наработке.

Замечания по 4-й главе

- 5 Следовало бы привести отдельные рекомендации для выбора порогового значения изменения локальных деформаций – ε_{th} для испытаний и для ожидаемых условий эксплуатации. Насколько можно судить по

приведенным в диссертации данным, для лабораторных условий пороговое значение определено консервативно, однако для условий эксплуатации с учетом широкого спектра факторов, влияющих на измерение деформаций, для оценки ε_{th} вероятно необходимо дополнительное исследование.

Несмотря на сделанные выше замечания, в целом можно сделать вывод, что в диссертационной работе достаточное внимание уделено вопросам обоснования точности получаемых результатов и корректности выдвигаемых положений и выводов. В первую очередь, это относится рекомендациям по выбору оптимальных параметров КЭ-разбиений зон, в которых предполагается наличие магистральных трещин, и зон расположения тензодатчиков.

В 4-ой главе также приведены рекомендации по применению упрощённых подходов к моделированию связей элементов рассматриваемых узлов, обеспечивающих, при существенном уменьшении затрат времени расчётов, достаточные для реализации предложенной методики мониторинга повреждений точность и объём данных о НДС исследуемых узлов.

На основе анализа основных результатов диссертационной работы А.А.Баутина можно сделать общий вывод, в ней содержатся ряд методических разработок, имеющих несомненные признаки **научной новизны**. Из них, в первую очередь следует отметить:

- методический подход, позволяющий на основе анализа кинетики местного НДС установить появление усталостных трещин в элементах фюзеляжных стыков авиационной конструкции на докритической стадии их развития;
- методику оценки параметров повреждений фюзеляжных стыков, (возникающих в результате циклической наработки и обнаруживаемых с использованием тензоизметри), которые можно считать безопасными;
- методику и соответствующую программу для определения зон локализации и определения оптимального количества требуемых тензорезисторов на основе решения экстремальной задачи нелинейного программирования;
- предложенный автором автоматизированный алгоритм оценки объёма экспериментальных данных, необходимых для определения связей между

флуктуациями параметров НДС размерами повреждений исследуемых объектов.

Результаты научно-методических разработок должны быть положены в обоснование сокращения сроков и снижения трудоёмкости натурных ресурсных испытаний, а также повышения информативности испытаний на усталость конструктивно-подобных образцов исследуемых объектов, проектируемых по принципу безопасного ресурса.

Это позволяет сделать вывод о несомненной **практической значимости** работы А.А. Баутина.

Содержание и структура диссертации, используемые подходы, предложенные алгоритмы и разработанные для их реализации программы характеризуют высокую научную квалификацию автора. При выполнении диссертации автор продемонстрировал хорошую подготовку в области решения задач механики деформируемого твёрдого тела и механики разрушения, как с применением численного моделирования, так и путём экспериментальных исследований, активное владение современными математическими методами и компьютерными технологиями. Это позволяет сделать вывод о **достоверности основных положений и выводов** работы.

Указанные выше замечания носят частный характер и не могут повлиять на **общую безусловно положительную оценку** работы.

Считаю, что диссертационная работа «Метод обнаружения повреждений в авиаконструкциях на основе мониторинга местного напряжённо-деформированного состояния» полностью удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Андрей Александрович Баутин заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в научных публикациях автора. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Оппонент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент -
главный научный сотрудник лаборатории
механики разрушения и живучести ИМАШ
РАН, профессор каф. «Прикладная
механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н.

И.А. Разумовский

e-mail: murza45@gmail.com

«13» марта 2025 г.

ФГБУН Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН
101000, Москва, М. Харитоньевский пер, 4

Подпись И.А. Разумовского заверяю

*Ведущий специалист
по кадровым вопросам
О.И. С.И.*



ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Попова Алексея Владимировича на диссертационную работу Баутина Андрея Александровича на тему: «Метод обнаружения повреждений в авиаконструкциях на основе мониторинга местного напряжённо-деформированного состояния», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14. – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Актуальность темы диссертационной работы

Своевременное и надежное обнаружение повреждений в силовых элементах конструкций, имеет высокую актуальность для разработки, производства, долгосрочных ресурсных испытаний и эксплуатации авиационной техники.

Представленная диссертация направлена на разработку и внедрение специальных автоматизированных средств диагностики и анализа текущего состояния конструкции, которые позволяют минимизировать участие обслуживающего персонала в выполнении работ по поддержанию летной годности. Сократить влияние человеческого фактора возможно с помощью разработки эффективных и соответствующих условиям эксплуатации и испытаниям летательных аппаратов методов контроля целостности авиационной конструкции для систем мониторинга состояния, которые позволят:

- сократить сроки проведения натурных испытаний, снизить стоимость испытаний, провести углублённый анализ критических мест разрабатываемой конструкции;
- уменьшить стоимость обслуживания за счет снижения/отмены запасов (коэффициентов надёжности) по допустимым наработкам и интервалам между осмотрами для ОСЭ, эксплуатируемых по живучести;
- уменьшить влияние человеческого фактора при поддержании летной годности во время эксплуатации и повысить надежность летательных аппаратов.

Потому цель данной работы заключается в разработке метода обнаружения усталостных многоочаговых повреждений в конструкции фюзеляжных стыков самолета на основе мониторинга местного НДС посредством анализа данных тензометрии.

Оценка новизны и практической значимости

Научная новизна исследований: состоит в применении нового разработанного автором метода обнаружения усталостных трещин в элементах фюзеляжных стыков на докритической стадии развития. В данном подходе используются следующие инновации:

- 1 На основе экспериментальных исследований получены данные о влиянии усталостных повреждений на изменение местных деформаций вблизи критических сечений типовых фюзеляжных стыков авиаконструкций, включающие показания периодической тензометрии, отличающиеся полученными зависимостями кинетики местного НДС от многоочаговых трещин, позволяющие использовать данные тензометрии для мониторинга состояния конструкции стыков с визуально не обнаруживаемыми повреждениями;
- 2 Разработан метод определения схемы тензометрии для мониторинга состояния стыков авиаконструкций, основанный на анализе НДС численными методами, отличающийся возможностью оптимизации количества датчиков и их расположения путем анализа зависимости между параметрами НДС и возникающими трещинами, позволяющий использовать данные тензометрии для своевременного обнаружения многоочаговых усталостных повреждений;
- 3 Разработан метод получения исходных данных для мониторинга состояния стыков авиаконструкций, включающий моделирование местного НДС с помощью МКЭ, отличающийся возможностью автоматизированного варьирования параметров многоочагового повреждения в критическом сечении стыков, позволяющий сформировать и проанализировать зависимость между повреждениями и границами зоны изменения деформаций с помощью искусственной нейронной сети (ИНС);
- 4 Разработан метод определения параметров усталостных повреждений в стыках авиаконструкций, основанный на анализе действующих в критическом сечении напряжений, отличающийся расчетно-экспериментальной оценкой суммарной площади многоочаговых усталостных трещин докритического размера, позволяющий сформировать характерную для типового стыка совокупность допустимых вариантов многоочагового повреждения.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что:

- 1 Результаты, полученные в работе и сформированные на их основе рекомендации, применялись для формирования экспертной документации («Заключение о функционале системы СКД-28 для контроля и диагностики состояния критических узлов и деталей жизненно важных агрегатов вертолѐта», акт АО «НЦВ Миль и Камов»);
- 2 Результаты диссертационной работы приняты к внедрению для разработки новых методов поддержания летной годности, основанных на применении принципов мониторинга состояния конструкции ЛА в ПАО «Корпорация «Иркут» (акт ПАО «Корпорация «Иркут» от 23.03.2022);

- 3 Разработанный метод внедрён в практику теоретических и экспериментальных исследований ФАУ ЦАГИ и используется для расширения возможностей сокращения длительности и снижения трудоёмкости натурных ресурсных испытаний авиаконструкций, а также для создания научно-технического задела по теме мониторинга (акт ФАУ ЦАГИ).

Общие сведения о диссертационной работе

Диссертационная работа Баутина А.А. состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы и 4-х приложений. Общий объём диссертационной работы составляет 154 страницы. Список литературы включает 126 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, поставлена цель, приведены задачи и методы исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности результатов, а также выносимые на защиту положения.

На защиту автором выносятся:

- 1 Результаты расчётно-экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность обнаружения усталостных повреждений, включая многоочаговые трещины в фюзеляжных стыках авиаконструкций на основе анализа кинетики местного НДС;
- 2 Метод мониторинга повреждений фюзеляжных стыков авиаконструкций при усталостных испытаниях с помощью анализа кинетики местного НДС, для реализации которого были разработаны:
 - метод оптимизации количества датчиков и определения их местоположения на основе анализа зависимости параметров НДС от усталостных повреждений;
 - безразмерный критерий оценки целостности элементов фюзеляжных стыков авиаконструкций для обнаружения повреждений путём мониторинга;
 - метод определения порогового значения относительного изменения деформации, соответствующего образованию значимого повреждения авиаконструкции;
- 3 Расчётно-экспериментальные значения параметров для определения допустимости повреждений в фюзеляжных стыках авиационных конструкций по предложенным методам.

Первая глава посвящена описанию основных принципов обеспечения безопасности по условиям прочности при эксплуатации самолётов в течение длительного периода. Рассмотрен современный подход к реализации эксплуатационной живучести и оценка экономической эффективности различных методов контроля целостности авиационной конструкции. В качестве альтернативы существующим способам поддержания летной

годности рассмотрен мониторинг состояния, реализуемый с помощью бортовых систем сбора данных.

При использовании точечных датчиков (тензорезисторов и оптоволоконных датчиков деформации) рассматривается задача определения оптимальной схемы мест измерения деформаций для получения наиболее полной картины повреждения при помощи минимального количества измерительного оборудования. Анализ изменения НДС повреждённых элементов при этом проводится с помощью обработки эмпирических данных о размерах и расположении дефектов, теоретического исследования критических по усталости мест конструкции и использования МКЭ на базе различных CAE-систем.

Во второй главе исследована кинетика местного НДС фюзеляжных стыков среднемагистрального пассажирского самолёта расчетными и экспериментальными методами. При исследовании оценивалась зона, на которой произошли наиболее значимые изменения деформаций при появлении повреждений, а также определялась относительная наработка, при которой происходило изменение местного НДС.

Приведены результаты тензометрии стыков при испытаниях на усталость, углублённый анализ длительности развития трещин с помощью методов фрактографии и анализ кинетики НДС при усталостных повреждениях образцов, полученный с помощью МКЭ. Дано качественное описание очагов усталостного разрушения, приведены данные о длительности роста трещин, полученные при обработке наиболее характерных зон исследуемых изломов. Экспериментальные исследования выполнены для поперечных фюзеляжных стыков с использованием тензодатчиков и периодических измерений, а также тензометрии в реальном времени с помощью распределённых систем измерения деформаций. Выполнен анализ кинетики НДС, полученный экспериментальным и расчетным способами для продольных и поперечных фюзеляжных стыков.

Третья глава посвящена описанию метода обнаружения повреждений в элементах конструкции фюзеляжных соединений на основе результатов тензометрии.

С использованием искусственного интеллекта разработана процедура обнаружения многоочаговых усталостных трещин в фюзеляжных стыках по данным тензометрии, одним из основных этапов которой является метод определения оптимальной схемы расположения датчиков. Представлены результаты определения оптимальных мест установки тензодатчиков для фюзеляжных стыков двух типов. Показано, что в зависимости от конструкции соединения для надёжного обнаружения усталостных трещин вблизи наиболее нагруженных рядов вблизи каждого 4-5 крепежных элементов может устанавливаться один датчик деформации.

В четвёртой главе приведены рекомендации для выбора значений параметров, которые используются при обнаружении повреждений по результатам тензометрии согласно разработанному методу. Проведён анализ

влияния принимаемых допущений и параметров моделирования НДС с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Приведены рекомендации для определения порогового значения относительного изменения деформации, которое свидетельствует о появлении в конструкции повреждений. Рассмотрено 2 подхода детерминистический и эмпирический. При детерминистическом подходе оценивается суммарный вклад всех факторов, которые могут влиять на определение величины ε_0 . При эмпирическом подходе проводится анализ фактических показаний датчиков, полученных при одинаковых значениях нагрузки в конструкции без повреждений, и определяется возможное изменение значения ε_0 .

Рассмотрен метод определения суммарной площади повреждений, которые принимаются безопасными и могут быть обнаружены с помощью анализа показаний тензодатчиков. В основе анализа используются результаты исследования изломов образцов фюзеляжных стыков методом фрактографии.

Приведены результаты решения различных задач, связанных с исследованием параметров моделирования НДС и принимаемых допущений при определении схемы установки датчиков:

- проведен анализ влияния дискретизации аргумента целевой функции, используемой для определения мест установки датчиков. Анализ выполнялся по результатам моделирования деформаций пластины с нагруженными отверстиями и трещинами, длина которых изменялась дискретно в зависимости от величины конечных элементов в критическом сечении;
- представлены результаты исследования влияния формы трещин при определении деформаций вблизи критических сечений МКЭ. Данные о типах, геометрических параметрах и распределении усталостных трещин были получены на основе анализа изломов испытанных образцов стыков.
- приведены результаты сравнения различных способов моделирования точечных связей для уменьшения времени расчета моделей соединений МКЭ при получении большого объема данных. В результате расчетных исследований показано, что применение упрощенных способов моделирования точечных связей практически не влияет на время расчета для рассмотренных схем соединения.

Применение разработанного подхода в экспериментальных исследованиях позволит уменьшить продолжительность испытаний до 30%.

В заключении обобщаются полученные результаты, приводятся рекомендации о направлениях их использования и перспективах дальнейшей разработки темы.

Общая характеристика работы

Представленная Баутиным Андреем Александровичем диссертация на соискание степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по разработке метода обнаружения усталостных многоочаговых повреждений в конструкции фюзеляжных стыков самолета на основе мониторинга местного НДС посредством анализа данных тензометрии и изложены новые научно обоснованные решения в области технической диагностики летательных аппаратов, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертация содержит ряд новых, практически значимых, научных результатов, имеет внутреннее единство и свидетельствует о личном вкладе соискателя в прикладную науку.

В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов. Предложенные автором диссертации решения строго аргументированы и объективно оценены по сравнению с другими известными решениями в этой научной области.

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 печатной работе, 6 из которых являются изданиями, рекомендованными ВАК РФ, 8 работ размещены в изданиях, индексируемым различными реферативными базами данных (Scopus, Springer). В тексте диссертации корректно приведены ссылки на авторов и источники, откуда заимствованы материалы или отдельные результаты выполненных исследований.

Замечания по содержанию диссертации и автореферата

- 1 Первая глава диссертационной работы включает в достаточной мере подробный обзор различных датчиков и методов, которые могут применяться для обнаружения повреждений в бортовой системе мониторинга. В связи с этим выбор автором тензодатчиков и методов тензоизмерений в качестве основы для разработки системы мониторинга требует дополнительного обоснования;
- 2 В диссертационной работе не приведены минимальные и рекомендуемые технические требования для измерительного и вычислительного оборудования, включая накопительные устройства, которые необходимы для реализации мониторинга состояния с помощью предложенного метода;
- 3 Раздел, содержащий методику мониторинга состояния стыков, и другие разделы работы не включают требований и рекомендаций о необходимости разработки алгоритмов первичной обработки данных (обработка выбросов и пропусков данных, фильтрация данных, выделение экстремумов и т.д.);
- 4 В работе рассмотрены 2 режима работы тензосистемы, при которых возможно обнаружение повреждений: периодическая тензометрия с

остановкой нагружения и непрерывный опрос датчиков в темпе эксперимента. При этом не дано рекомендаций относительно выбора наиболее предпочтительного способа, а также не приведены параметры рассмотренных способов тензометрии, необходимые для мониторинга состояния (частота и точность измерений, необходимость регистрации вспомогательных данных: нагрузок, количества циклов и т.д.);

- 5 Образцы фюзеляжных стыков, используемые для определения суммарной безопасной площади трещин, имеют частные конструктивные различия (Приложение В). Для объективного анализа картины разрушения и подтверждения достоверности, полученных в результате обработки эксперимента, данных рекомендуется привести получаемые характеристики с учетом отдельных групп с единым конструктивным исполнением образцов и провести анализ их различия;
- 6 Отдельные части текста диссертационной работы содержат неточности или оформлены не в соответствии с требованиями ГОСТ 7.0.11–2011:
 - На стр. 31 указана неверная ссылка на рисунок 1.8 (а). На стр. 38 есть ссылка в тексте на рисунок, но нет рисунка 1.14 (г);
 - Список обозначений и сокращений не включает сокращения, используемые в приложениях к работе. Список сокращений не упорядочен в соответствии с требованиями ГОСТ и не размещен после основного текста работы.

Замечания не снижают общую теоретическую и практическую значимость диссертационной работы Баутина А.А.

Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертация Баутина Андрея Александровича является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Работа выполнена на актуальную тему, базируется на репрезентативном объеме данных, примеров и расчетов. Сформулированные научные положения и выводы являются обоснованными и достоверными. Положения, выносимые на защиту, апробированы и в достаточной мере освещены в научной печати. Автореферат достаточно полно отражает основные научные положения и выводы, сделанные в диссертации. Результаты диссертационной работы проверены в ходе натурных испытаний и внедрены для использования в организациях, являющихся разработчиками методов и средств для оценки прочностных характеристик летательных аппаратов.

Таким образом, представленная диссертационная работа соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года (в действующей редакции), а её автор Баутин Андрей Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени

кандидата технических наук по специальности 2.5.14. – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

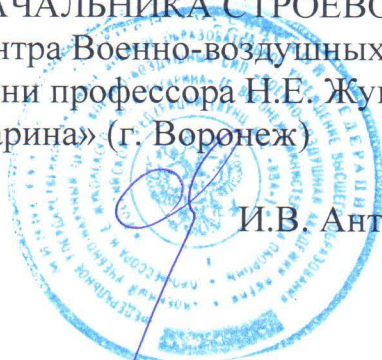
Официальный оппонент:
доктор технических наук, профессор



А.В. Попов

Подлинность подписи доктора технических наук, профессора
Попова Алексея Владимировича
ЗАВЕРЯЮ

СТАРШИЙ ПОМОЩНИК НАЧАЛЬНИКА СТРОЕВОГО ОТДЕЛА
Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-
воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)



И.В. Антонов

«14» марта 2025 г.

Попов Алексей Владимирович, доктор технических наук (специальность 20.02.14 – Вооружение и военная техника. Комплексы и системы военного назначения), профессор (специальность 20.02.14 – Вооружение и военная техника. Комплексы и системы военного назначения), профессор кафедры восстановления авиационной техники ФГКВОУ ВО «ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

Адрес: 394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А».

Тел.: +79102460611

E-mail: avpnil@rambler.ru