



**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук
(ИМАШ РАН)**

Малый Харитоньевский пер., дом 4, Москва, 101000
телефон/факс: (495) 624-98-00, (495) 624-98-63, e-mail: info@imash.ru, www.imash.ru
ОКПО 00224588, ОГРН 1037700067492, ИНН 7701018175, КПП 770101001

19.04.2022 № 11503-ИМ/12-150
На № 010/1487-1 от 11.02.2022 г.



УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора ИМАШ РАН
по научной работе

д.т.н., профессор М.Н. Ерофеев

«19» апреля 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Гавва Любови Михайловны
«Методы анализа статической прочности и устойчивости конструктивно-анизотропных панелей летательных аппаратов из композиционных материалов на основе уточнённой теории с учётом технологии изготовления»,
представленную на соискание учёной степени
доктора технических наук по специальности 05.07.03 -
Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Актуальность темы диссертации

Авиастроительная промышленность требует снижения затрат на разработку и эксплуатацию авиационной техники в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Снижение веса планера за счёт использования структурных резервов в композитных авиационных конструкциях способствует достижению данной цели, однако, необходимо точное и экспериментально подтверждённое моделирование напряжённо-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости реальных конструкций в реальных условиях нагружения.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

22 04 2022

Вышеизложенное указывает на **актуальность** комплексного изучения проблем статики и устойчивости эксцентрично подкреплённых прямоугольных панелей из композиционных и изотропных материалов с учётом технологии изготовления в условиях силового и температурного воздействия как элементов несущих поверхностей летательных аппаратов (ЛА). Разработка и реализация новых эффективных аналитических методов и подходов к исследованию статической прочности и устойчивости конструктивно-анизотропных панелей несущих поверхностей ЛА является **актуальной научной проблемой** как в фундаментальном, так и в прикладном отношении.

Научная новизна диссертации

Выполненное в диссертации дальнейшее развитие теории тонкостенных упругих стержней В.З. Власова применительно к общей контактной задаче для обшивки и ребра с учётом деформации сдвига при закручивании составляет **научную новизну** работы. К **новым научным результатам** относятся:

1. Формирование новой обобщённой универсальной математической модели для исследования прочности и устойчивости конструктивно-анизотропных панелей ЛА, находящихся в условиях силового и температурного воздействия; технологический процесс принимается во внимание на этапе разработки изделия из полимерных композиционных материалов.

2. Обобщение комплексной системы новых уточнённых расчётных моделей для класса конструктивно-анизотропных панелей несущих поверхностей ЛА, изготовленных из композиционных и изотропных материалов.

3. Постановка и решение новых краевых задач статики конструктивно-анизотропных панелей ЛА; реализация решения краевых задач с дифференциальными операторами уравнений равновесия двенадцатого и восьмого порядков в одинарных тригонометрических рядах.

3. Доказательство правомочности значительного упрощения обобщённой универсальной математической модели при определении основного напряжённого состояния без учёта краевых эффектов, в широком диапазоне жесткостей панелей в соответствии с теорией асимптотического интегрирования дифференциальных уравнений.

4. Распространение приёмов исследования различных краевых бигармонических задач – вариантов метода однородных решений – на интегрирование дифференциального уравнения восьмого порядка при расчёте конструктивно-анизотропных панелей с реальными условиями закрепления контура в составе проектируемой конструкции.

5. Разработка методологии определения критических сил различных форм потери устойчивости конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов с учётом неравномерности исходного сложного докритического напряжённого состояния, формулы для критических параметров изгибной и крутильной форм рекомендуется использовать в качестве ограничений целевой функции при последующей реализации решения проблемы проектирования несущих поверхностей ЛА,

6. Оценка влияния технологии изготовления на статику и устойчивость конструктивно-анизотропных панелей из полимерных волокнистых композиционных материалов в рамках решения краевых задач для уравнения восьмого порядка.

7. Разработка нового универсального математического аппарата и нового компьютерного математического обеспечения для реализации процесса компьютерной многокритериальной оптимизации с учётом технологии изготовления конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов, находящихся в условиях механического, внешнего температурного и технологического температурного воздействий.

Теоретическая значимость работы определяется её новизной.

Практическая ценность диссертации

В операционной среде MATLAB разработан пакет прикладных программ и реализован процесс компьютерной многокритериальной оптимизации с учётом технологии изготовления конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов, находящихся в условиях механического, внешнего температурного и технологического температурного воздействия.

Разработаны быстрые процедуры для анализа прочности и устойчивости подкреплённых панелей из КМ. Так как решение строится точными аналитическими методами, время расчёта минимально, что представляет интерес с точки зрения практики проектирования с использованием параметрического анализа. Результаты расчётов на прочность и устойчивость с учётом технологических факторов дают возможность снижения и оптимизации весовых характеристик конструкции.

Анализ влияния различных жесткостных, геометрических и конструктивных параметров на прочность и устойчивость анизотропных панелей позволил оценить пределы применимости существующих расчётных моделей и методов, а также выявить некоторые второстепенные факторы, которые в значительной мере упрощают задачу.

Построенные алгоритмы и разработанный комплекс MATLAB-программ предназначены для дальнейшего применения при проектировании авиационной техники. Уточнение в отношении возможностей конструкции противостоять продольно-поперечным и температурным внешним воздействиям при жёстких требованиях к весу и надёжности составляет основу любого анализа о минимальной массе в рамках решения задачи о проектировании под заданную стоимость.

Практическая значимость диссертации подтверждается поддержкой гранта Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSFF-2020-0013, руководитель В.Ю. Гидаспов, поддержкой гранта КИАС РФФИ, проект № 17-08-00849/17, руководитель В.В. Фирсанов.

Результаты исследований используются в учебном процессе МАИ (НИУ) в курсе лекций по прочности конструкций, при руководстве курсовыми проектами, при руководстве диссертациями магистрантов совместного университета МАИ – ШУЦТ (Шанхайский университет Цзяо Тун), Shanghai, China.

Значимость полученных автором диссертации результатов

Результаты диссертационной работы Гавва Л.М. внедрены в ОКБ Сухого и использованы в исследовательских работах по перспективным направлениям развития самолётостроения. Материалы, полученные при выполнении диссертации, а именно - математическое моделирование типовой панели планера из композиционных материалов в рамках уточнённой теории; - методы математического моделирования; методология и результаты прочностного расчёта; - методы математического моделирования; - методология и результаты расчёта на устойчивость использованы при анализе поведения композитных панелей крыла современного самолёта и перспективного БЛА. Внедрение полученных соискателем результатов позволяет повысить эффективность опытно-конструкторских работ путём введения дополнительных факторов при проектировании, повышения точности моделирования, применения уточнённых ограничений по прочности и устойчивости в различных алгоритмах оптимизации.

Целью диссертации является разработка в рамках междисциплинарного подхода на основе уточнённой теории с учётом технологии изготовления проблем комплексного исследования статической прочности и устойчивости эксцентрично подкреплённых прямоугольных панелей из композиционных и изотропных материалов как элементов несущих поверхностей ЛА. Разработка универсального математического аппарата и компьютерного математического обеспечения для снижения и оптимизации весовых характеристик конструктивно-анизотропных панелей ЛА из композиционных материалов необходима при последующей реализации

решения проблемы проектирования под заданную стоимость, - в качестве перспективы дальнейшей проработки темы.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений с актами внедрения результатов исследования. Общий объём диссертации составляет 315 страниц, работа содержит 43 рисунка, 12 таблиц. Список публикаций соискателя и использованных источников включает 364 наименования.

Достоверность основных научных положений, заключения и рекомендаций, сформулированных в работе

Общее заключение и выводы по результатам диссертационной работы не оставляют сомнений.

Достоверность результатов диссертации определяется использованием в работе фундаментальных положений механики деформируемого твёрдого тела и строгих аналитических методов теории упругости, строительной механики тонкостенных конструкций, механики композиционных материалов. Теоретические выводы подтверждаются сопоставлением с численными решениями и согласуются с экспериментальными результатами, полученными соискателем, а также с результатами вычислений и экспериментов, заимствованными из литературных источников.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации:

1. На основании проведённого анализа компонентов сложного напряжённо-деформированного состояния с учётом и без учёта краевых эффектов, установлено, что краевыми эффектами можно пренебречь в широком диапазоне жесткостей конструктивно-анизотропных панелей, при этом погрешность не превышает 3%.
2. Учёт деформации сдвига в рамках теории тонкостенных упругих стержней для панелей из углепластика приводит к снижению прогибов в среднем на 17% по сравнению с «чистым» кручением.

3. Учёт деформации сдвига в рамках теории тонкостенных упругих стержней для панелей из алюминиевого сплава, армированных жгутами из композиционных материалов, приводит к снижению прогибов и нормальных напряжений в поперечном направлении в среднем на 27%, продольных нормальных напряжений – в среднем на 8% по сравнению с «чистым» кручением.

4. Установлено, что результаты определения сложного напряжённо-деформированного состояния в рамках гипотезы Кирхгофа и при решении контактной задачи совпадают с точностью до 13%, если обшивка подкреплена ортогонально расположенными рёбрами жёсткости. Значительные расхождения имеют место в конструкции с однонаправленным набором, для панелей с ярко выраженной анизотропией свойств.

5. Влияние предварительного натяжения армирующих волокон на уровень остаточных технологических напряжений, возникающих при охлаждении после завершения процесса отверждения в плоских прямоугольных панелях из углепластика с несимметричной структурой пакета по толщине, а также в интегральных панелях с эксцентричным продольно-поперечным набором, следует оценивать в рамках решения краевых задач для дифференциального уравнения с линейным дифференциальным оператором восьмого порядка.

6. Наибольший интерес для проектирования конструктивно-анизотропных панелей несущих поверхностей ЛА представляет определение критических параметров общей изгибающей и многоволновой крутильной форм потери устойчивости в рамках уточнённой теории. Приведенные в диссертации результаты параметрического анализа в широком диапазоне изменения геометрических параметров панелей определяют характеристики равноустойчивости.

7. Для определения компонентов напряжённо-деформированного состояния и критических параметров конструктивно-анизотропных панелей на основе уточнённой теории с учётом технологии изготовления составлен комплекс программ в операционной среде MATLAB, который может быть использован

в дальнейшем в системе автоматизированного проектирования при решении задачи проектирования изделия под заданную стоимость.

8. Комплексные решения сформулированных проблем и задач возможно эффективно использовать на различных этапах проектирования панелей несущих поверхностей ЛА из композиционных материалов при выборе конструктивных вариантов. При исследовании целевых функций на условный экстремум в строгой математической постановке решения задач статики и устойчивости, построенные в рамках уточнённой теории, логично вводить в качестве строгих ограничений.

Оценка содержания диссертации

Текст диссертации логически выстроен, диссертация наглядно иллюстрирована. По содержанию работы имеются следующие замечания:

1. В общей характеристике отмечено: «Главные проекты – ближне-среднемагистральный пассажирский самолёт МС-21 и другие, где применение композиционных материалов является ключевым аспектом». Однако, разработанная автором новая обобщённая универсальная математическая модель для исследования прочности и устойчивости конструктивно-анизотропных панелей несущих поверхностей ЛА из композиционных материалов пригодна для тонкостенных конструкций. Там, где толщина обшивки существенно увеличена, необходимо принимать во внимание и вводить в уравнения касательные напряжения поперечного сдвига и нормальные напряжения обжатия нормали.

2. Автором диссертации в соответствии с темой исследования и целью диссертационной работы разработаны и усовершенствованы методы анализа статической прочности и устойчивости конструктивно-анизотропных панелей ЛА из композиционных материалов на основе уточнённой теории с учётом технологии изготовления. Методы анализа динамической прочности конструктивно-анизотропных панелей ЛА из композиционных материалов на основе уточнённой теории представляют несомненный интерес.

3. Во введении на Рисунке 9 приведена блок-схема с наглядной демонстрацией научных школ и направлений исследований проблем прочности и устойчивости конструктивно-анизотропных панелей из ПКМ отечественных авторов. Блок-схема с наглядной демонстрацией научных школ и направлений исследований зарубежных авторов отсутствует. Представленный в первой главе детальный обзор российских и зарубежных публикаций за последние двадцать пять лет даёт возможность оценить современное состояние вопроса, очерчивает область дальнейших научных разработок.

Основное содержание диссертации изложено в пятнадцати публикациях в изданиях перечня ВАК, из которых три публикации проиндексированы в международных базах данных. Основные положения и результаты доложены и обсуждены на международных и всероссийских научных конференциях, симпозиумах и семинарах. Пять публикаций статей по материалам конференций проиндексированы в SCOPUS и Web of Science.

В автореферате излагаются основные идеи и выводы диссертации, показан вклад автора в проведённое исследование, степень новизны и практическая значимость приведенных результатов, приводится список публикаций соискателя, в которых отражены основные научные результаты диссертации.

Обсуждение диссертации проведено 12.04.2022 г. на заседании Научно-технического совета ИМАШ имени А.А. Благонравова РАН, где принимали участие руководители структурных подразделений организации, основные направления научно-исследовательской деятельности которых соответствуют тематике диссертации.

Заключение

Диссертация Гавва Л.М. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решена актуальная научная проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение. Изложены разработанные новые научно обоснованные методы обеспечения прочности и устойчивости

конструктивных элементов несущих поверхностей современной авиационной техники. Изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие авиационной промышленности. Диссертация Гавва Л.М. выполнена на высоком научном уровне. В тексте диссертации и в Заключение содержатся конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов соискателя. По научной и практической ценности, значимости полученных автором диссертации результатов для развития самолётостроения диссертация Гавва Л.М. соответствует критериям, в том числе, - требованиям пп. 9 – 14 и 24 Положения ВАК о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, с изменениями, которые введены Постановлением Правительства РФ от 20.03.2021 № 426. Автор диссертации, Гавва Любовь Михайловна, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Главный научный сотрудник ИМАШ РАН
Д.т.н., профессор
Nik_azikov@mail.ru


Н.С. Азиков


Уч. Секретарь НТС ИМАШ РАН
к.т.н., н.с.
skvortsovpa@yandex.ru


П.А. Скворцов

Подписи Н.С. Азикова и П.А. Скворцова заверяю
Зам. Начальника отдела кадров




С.И. Демидова
19.04.2022

С отзывом ведущей организации ИМАШ РАН
ознакомлена →  / Гавва Л.М. /
25.04.2022г.