

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию 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»

Эффективность новых объектов авиационной техники во многом зависит от оптимальности силовых несущих конструкций. Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в несущих конструкциях современных летательных аппаратов (ЛА) является ключевым аспектом. С заменой металлических конструкций на композитные происходит смена подходов к проектированию в рамках использования структурных резервов ПКМ. Расчёт и проектирование конструкций из композиционных материалов рассматриваются как важнейшее тематическое направление при реализации приоритетных комплексных проектов. Для снижения веса планера и улучшения лётно-технических характеристик необходимы точный и экспериментально подтверждённый анализ, моделирование напряжённо-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости реальных конструкций, находящихся в реальных условиях нагружения. Перспективное направление исследований – проектирование композитных конструкций с учётом технологии изготовления, когда технологический процесс принимается во внимание на этапе разработки изделия. Вопросы, возникающие в практике проектирования авиационной техники при жёстких требованиях к её весу, надёжности и стоимости, служат постоянным стимулом к дальнейшему развитию теории.

Вышеизложенное указывает на **актуальность темы диссертационной работы.**

Цель диссертации заключается в разработке 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 металлических материалов как элементов несущих поверхностей ЛА.

Общая характеристика работы приведена во **введении**, где аргументированы актуальность научной проблемы, степень её разработанности, цель и задачи исследования, научная новизна и новые научные результаты, теоретическая и практическая значимость работы, методология исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности полученных результатов, представлены апробация диссертации и личный научный вклад автора.

Классификация и анализ основных направлений развития теории, обзор публикаций, посвящённых построению расчётных моделей, разработке аналитических, численных и экспериментальных методов исследования напряжённого состояния и устойчивости конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов, представлены в **Главе 1**. Список публикаций соискателя и использованных источников отечественных и зарубежных авторов включает 364 наименования. Детально проанализированы обзорная литература, математическое моделирование, математическое моделирование при термомеханическом воздействии, математическое моделирование с учётом технологии изготовления, аналитические методы решения задач статики,

численные методы решения задач статики, экспериментальные исследования, постановка задач устойчивости, постановка задач устойчивости при термомеханическом воздействии, постановка задач устойчивости с учётом технологии изготовления, аналитические методы решения задач устойчивости, численные методы решения задач устойчивости, экспериментальные исследования устойчивости, оптимальное проектирование. Дана оценка современного состояния проблемы, сформулированы направления дальнейших научных исследований.

В Главе 2 построены математические модели конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов, находящихся под действием произвольной поперечной нагрузки и температуры, с учётом технологии изготовления.

Разработана проблема исследования сложного напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструктивно-анизотропных композитных панелей в уточнённой постановке в рамках многодисциплинарного подхода. Для определения НДС рёбер жёсткости применяется предложенный В.З. Власовым вариационный метод расчёта тонкостенных пространственных систем в перемещениях, дающий возможность впервые построить теорию тонкостенных упругих стержней в условиях косоугольного изгиба и стеснённого кручения без введения гипотезы об отсутствии деформации сдвига срединной поверхности профиля.

Глава 3 посвящена разработке аналитических методов исследования проблем статической прочности при определении сложного НДС конструктивно-анизотропных панелей с граничными условиями общего вида.

С математической точки зрения проблема исследования основного напряжённо-деформированного состояния конструктивно-анизотропных панелей, трактуемых как ортотропные, сводится к решению краевых задач в прямоугольной области для неоднородного линейного дифференциального уравнения восьмого порядка в частных производных относительно искомой потенциальной функции.

Изложен алгоритм нового метода, позволяющего представить решение дифференциального уравнения восьмого порядка в частных производных в виде разложения по неортогональной системе обобщённых собственных функций с коэффициентами, определяемыми явно.

В Главе 4 представлены результаты численной реализации разработанных алгоритмов на основе уточнённой теории при определении общего напряжённого состояния с краевыми эффектами и основного напряжённо-деформированного состояния конструктивно-анизотропных панелей. Продемонстрированы новые алгоритмы в области вычислительных исследований сложного напряжённо-деформированного состояния композитных авиационных конструкций.

На основе полученных результатов численного анализа в широком диапазоне изменения геометрических и жесткостных характеристик конструктивно-анизотропных панелей обоснована возможность проекторочного расчета (без учёта краевых эффектов) в соответствии с теорией асимптотического интегрирования дифференциальных уравнений.

Глава 5 содержит исследование различных аспектов проблем устойчивости конструктивно-анизотропных панелей с граничными условиями общего вида. Выполнено математическое моделирование общей изгибаемой формы потери устойчивости, включая постановку задачи и вывод разрешающих уравнений. Предлагается математическое

моделирование многоволновой крутильной формы потери устойчивости (так называемое заваливание стрингеров) в рамках вариационной формулировки задачи с последующим выводом разрешающих уравнений. Постановка задач устойчивости и подходы к решению с учётом неравномерности докритического напряжённого состояния и технологии изготовления панелей в рамках разрешающего дифференциального уравнения восьмого порядка являются новыми и представляют интерес с точки зрения практики проектирования композитных панелей для перспективных изделий авиационной техники.

В Главе 6 получены результаты численной реализации разработанных алгоритмов на основе уточнённой теории при исследовании проблем устойчивости конструктивно-анизотропных панелей. Представлены новые алгоритмы в области вычислительных исследований устойчивости композитных авиационных конструкций.

Глава 7 посвящена верификации математических моделей. Приведены результаты экспериментальных исследований устойчивости и деформированного состояния конструктивно-анизотропных панелей.

Проведены экспериментальные исследования устойчивости конструктивно-анизотропных панелей из композиционных материалов. Результаты натурных экспериментов и расчётные данные совпадают качественно по формам потери устойчивости и количественно с точностью до 12–13 %, если не рассматривать переменное докритическое напряжённое состояние. Учёт неравномерности основного напряжённого состояния приводит к увеличению точности до 8–10 %.

Представлены результаты экспериментальных исследований устойчивости конструктивно-анизотропных панелей из металлических сплавов, усиленных композитными жгутами, а также экспериментальных исследований устойчивости конструктивно-анизотропных панелей кессона из изотропных материалов, усиленных жгутами из ПКМ.

В Приложении размещены Акты внедрения полученных в диссертации результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в ОКБ Сухого и использованы в исследовательских проектах по перспективным направлениям развития самолётостроения. Результаты исследований, полученные и изложенные в диссертации, адаптированы к учебному процессу МАИ (НИУ) при реализации образовательных программ высшего образования по прочности конструкций, механике конструкций из композиционных материалов.

Общий объём диссертации составляет 315 страниц, работа содержит 43 рисунка, 12 таблиц.

К новым научным результатам относятся:

- 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,

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

- 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,

- 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,

- 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,

- 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,

- 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,

- 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.

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 определяет **научную новизну работы**.

Следует подчеркнуть, что вклад в развитие теории тонкостенных упругих стержней и панелей, односторонне подкреплённых такими стержнями, осуществлён в рамках научной школы В.З. Власова, что демонстрирует её преемственность и жизнеспособность.

Также к достоинствам диссертации с точки зрения **научной новизны** следует отнести использование метода бесконечных псевдодифференциальных операторов Васильева-Лурье для построения точного аналитического решения бигармонических задач.

Достоверность результатов диссертации основывается на использовании в работе фундаментальных положений механики деформируемого твёрдого тела. Методология как совокупность методов исследования включает аналитические методы теории упругости, строительной механики тонкостенных конструкций, механики композиционных материалов: решение в перемещениях, теорию тонкостенных упругих стержней, вариационный принцип Лагранжа, теорию асимптотического интегрирования дифференциальных уравнений, метод символического интегрирования дифференциальных уравнений, решение краевых задач для дифференциальных уравнений высоких порядков в тригонометрических рядах, модификации метода однородных решений. Теоретические выводы подтверждены сравнением с численными решениями и

согласуются с экспериментальными результатами, полученными соискателем, а также заимствованными из литературы.

В качестве методологической основы соискателем используется системный подход с отдельным формированием моделей и алгоритмов, с последующим построением **научно обоснованных** обобщённых универсальных расчётных схем для исследования прочности и устойчивости конструктивно-анизотропных панелей ЛА, находящихся в условиях силового и температурного воздействия, с учётом технологии изготовления. **Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**, опирается на апробированные математические методы механики сплошной среды.

Практическая значимость 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 ПКМ. Так как решение строится точными аналитическими методами, время расчёта вариантов минимально, что представляет интерес для практики рационального проектирования с использованием параметрического анализа.

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. По результатам диссертации опубликовано 29 работ.

Замечания по диссертационной работе:

1. Эффекты обжатия нормали и деформации поперечного сдвига целесообразно иметь в виду при разработке сложных математических моделей для несущих поверхностей летательных аппаратов, изготовленных из композиционных материалов. Было бы желательно, как минимум, заменить гипотезы Кирхгоффа гипотезами Тимошенко для композиционных пластин.

2. Термин «с учетом технологии изготовления» сводится к единственной технологии – выкладке лентой с регулируемым натягом.

3. Основные технологии – автоклавное формование для высоконагруженных элементов и пропитывание для вторичных не упоминается даже вкратце.

4. При выводе разрешающего уравнения восемнадцатого порядка относительно скалярного потенциала было бы желательно представить этот оператор в виде произведения операторов второго порядка и дать трактовку физического смысла каждого из этих операторов и трактовку соответствующих обобщенных жесткостей в них.

Отмеченные выше замечания носят рекомендательный характер, не снижают научную и практическую ценность диссертации, не ставят под сомнение значимость представленных в диссертации результатов, квалификацию соискателя и положительную оценку диссертационной работы Л.М. Гавва.

Содержание автореферата диссертации в полной мере отражает содержание диссертации.

Заключение. Диссертация Гавва Л.М. соответствует паспорту специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов». Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, в которой решена актуальная научная проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение. Разработаны новые научно обоснованные методы обеспечения прочности и устойчивости конструктивных элементов 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. По актуальности темы, степени обоснованности основных научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверности и новизне, а также ценности для науки и практики диссертация соответствует критериям, в том числе, - требованиям пп. 9 – 14 Положения ВАК о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, с изменениями, которые установлены 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».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
лаборатории неклассических моделей
механики композиционных материалов
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт прикладной механики
Российской академии наук ИПРИМ РАН



Белов Пётр Анатольевич

125040, г. Москва, Ленинградский пр., д. 7
Институт прикладной механики
Российской академии наук ИПРИМ РАН
belovpa@yandex.ru
+7 (915) 335-88-35

Подпись доктора физико-математических наук
Белова Петра Анатольевича заверяю
Учёный секретарь ИПРИМ РАН
кандидат физико-математических наук



Карней Юлия Николаевна

21.04.2022 г.



С отзывом официального оппонента
Белова П. А. ознакомлена
26.04.2022 г. Гавва Л.М.