

ОТЗЫВ

официального оппонента Федулова Бориса Никитовича

на диссертационную работу Корольского Владислава Валентиновича «Метод оптимального проектирования конструктивно анизотропных панелей несущих поверхностей летательных аппаратов из композиционных материалов с ограничениями по устойчивости на основе уточнённой теории», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. – «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертации

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые обладают повышенными прочностными и жесткостными свойствами по сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами, внедрены в авиастроение в середине 70-х годов прошлого века. ПКМ нашли применение в слабонагруженных элементах конструкции, таких как элементы механизации и управления воздушным судном. В настоящее время широко эксплуатируются зарубежные самолеты Boeing 787 и Airbus A350, запускается в эксплуатацию отечественный среднемагистральный самолет МС-21, в которых композиты применяются в основной силовой конструкции планера. ПКМ являются ключевыми материалами при формировании конструктивно-силовой схемы различных типов летательных аппаратов, создаваемых как в нашей стране, так и за рубежом.

Вопросы, связанные с весовой эффективностью применения композитов в гражданском авиастроении, до сих пор остаются открытыми. Внедрение уточнённых методов отработки прочности и устойчивости в процесс проектирования авиаконструкции требует необходимости создания соответствующей методологической базы. Вопросы устойчивости композитных конструкций должны уточняться на ранних этапах проектирования для оптимального выбора параметров конструкции.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«26» 11 2025 г.

Разработке метода оптимального проектирования конструктивно анизотропных панелей несущих поверхностей летательных аппаратов из композиционных материалов с ограничениями по устойчивости на основе уточнённой теории посвящена диссертационная работа, что подтверждает ее актуальность. Направление исследования, равно как и объекты исследования, полностью соответствуют актуальной тематике.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений с актами внедрения результатов исследования. Структура работы отражает перечень задач, сформулированных в соответствии с поставленной в работе целью. Общий объём диссертации составляет 186 страниц, работа содержит 58 рисунков, 25 таблиц. Список публикаций состоит из 110 наименований.

Оценка содержания диссертации

Во Введении приведена общая характеристика работы: обоснована актуальность научной проблемы, представлена степень разработанности темы исследования, определены объект исследования и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов, апробация работы, структура и объём диссертации и личный вклад автора.

В первой Главе диссертационной работы выполнен обзор современных исследований, посвящённых проектированию конструктивно анизотропных панелей из композиционных материалов. Проведена систематизация существующих публикаций на основе объектов и методов исследования. Рассмотрены различные аналитические и численные методы проектирования, а также ограничения при проектировании.

Во второй Главе диссертационной работы рассматривается

оптимальное проектирование конструктивно анизотропных тонкостенных обшивок из композиционных материалов. Представлена постановка задачи оптимального проектирования, предложена математическая модель гладкой тонкостенной обшивки с анизотропией свойств, обусловленной несимметричной по толщине укладкой слоёв. Сформулированы ограничения на целевую функцию веса конструкции при оптимальном проектировании. Приведены результаты численной реализации оптимального размерно-весового проектирования гладких тонких обшивок с учётом уточнённых ограничений по устойчивости.

В **третьей Главе** диссертационной работы анализируются ограничения по устойчивости, применимые при оптимальном проектировании конструктивно анизотропных обшивок летательных аппаратов средней и большой толщины из композитных материалов. Осуществлены постановка задач статического анализа, моделирование напряжённо-деформированного состояния и устойчивости панелей с учётом деформаций поперечного сдвига. Разработано аналитическое решение задачи устойчивости для выведенного впервые нового разрешающего дифференциального уравнения десятого порядка в частных производных. Проведена оценка пределов применимости аналитических ограничений по устойчивости, соответствующих различным теориям, при проектировании толстостенных композитных обшивок. Представлена численная реализация ограничений на целевую функцию веса при оптимизации панелей в зоне стыка крыла с фюзеляжем.

Четвёртая Глава диссертационной работы посвящена задачам оптимального проектирования конструктивно анизотропных тонкостенных подкреплённых панелей из композиционных материалов. Сформулирована проблема построения спектра оптимальных проектных параметров продольно подкреплённых композитных панелей самолёта минимальной массы. Решение сводится к поиску условного экстремума многопараметрической целевой функции веса с использованием аналитических методов в сочетании с методами нелинейного программирования. Приведены размерно-весовые

проекты для углепластиковых стрингерных панелей, полученные в рамках многоуровневой оптимизации при дискретном варьировании углов укладки слоёв.

Заключение диссертации содержит семь новых научных результатов, отражающих исследование задач, сформулированных для достижения целей работы. Отражены перспективы дальнейшей разработки темы.

В Приложении размещены Акты внедрения результатов диссертации в учебный процесс Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и в исследовательские работы филиала ПАО «Яковлев» «Региональные самолеты».

Основное содержание диссертации изложено в двенадцати публикациях, в том числе – в двух изданиях Перечня ВАК по специальности 2.5.13., в двух изданиях, проиндексированных в международных базах данных SCOPUS и Web of Science, – в семи публикациях по материалам международных и всероссийских научных конференций, – в свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В автореферате излагаются основные положения и результаты диссертации, продемонстрирован личный вклад автора в проведённое исследование, отражено соответствие диссертации Паспорту специальности 2.5.13. «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов», приведён список публикаций, в которых отражены основные научные результаты диссертации. Автореферат и список публикаций полностью отражают содержание диссертации.

Новизна научных результатов

Разработан новый метод оптимального проектирования конструктивно анизотропных панелей несущих поверхностей летательных аппаратов из композитных материалов с уточнёнными аналитическими ограничениями по потере устойчивости.

Сформулирована математическая модель и выполнено исследование

устойчивости статических состояний равновесия композитных панелей средней и большей толщины, являющихся элементами авиационных конструкций, на базе теории, принимающей во внимание трансверсальную деформацию сдвига, - теории первого порядка.

Построены аналитические решения задач о потере устойчивости в линеаризованной постановке, которые доведены соискателем до численных результатов, использованных при параметрическом анализе, в том числе при оценке границ области применимости канонической теории пластин, основанной на гипотезах Кирхгофа. Поскольку вопрос о допустимости применения данной, наиболее простой модели, должен быть в обязательном порядке задан при постановке задачи расчета нетонкой неоднородной анизотропной обшивки во избежание недопустимой ошибки, оценка верхней границы области приемлемой погрешности теории Кирхгофа является актуальной проблемой механики композитных панелей. Так как оценки границ области применимости теорий соискателем получены, результаты диссертации представляют очевидный интерес. Представление числовых результатов в таблицах выполнено аккуратно и подробно. Оценка границы области применимости теории того или иного типа привязана к безразмерной величине (b/h) , а не размерной толщине; оценка оказывается не связанной с фиксированными габаритными размерами панели.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в развитии математических методов и программных средств для оптимального проектирования композитных конструкций крыла на ранних этапах проектирования летательных аппаратов.

Результатом аналитического решения задач устойчивости являются аналитически сформулированные ограничения в форме неравенств при получении конечных соотношений для критических параметров нагрузки в

явном виде, что чрезвычайно важно.

На основе нового математического метода создан пакет прикладных программ в MATLAB для размерно-весовой оптимизации анизотропных панелей из углепластика. Оптимизация выполнена в строгой математической постановке с аналитическими ограничениями, что значительно сократило время расчётов.

Разработанная программа позволяет определять оптимальные параметры конструкции - толщины слоёв, шаг, высоту стенки, ширину полки стрингеров, массу и критические нагрузки - и обеспечивает контроль ограничений при проектировании.

Результаты применяются в исследовательских проектах Филиала ПАО «Яковлев» «Региональные самолёты» и используются в образовательном процессе МАИ по направлению «Авиастроение».

Достоверность исследования подтверждается корректной постановкой задачи, полнотой расчётной модели и корректностью математической обработкой данных. Теоретические результаты соотносятся с данными натурных экспериментов, опубликованными в литературе, что обеспечивает верификацию и валидацию ограничений по устойчивости на целевую функцию веса. При численной реализации обеспечивается сходимость к оптимальным значениям веса и геометрических параметров панелей.

При адекватной постановке задачи и выборе метода исследования, а также достоверных результатах по содержанию работы имеются следующие **замечания**:

1. Автором в нескольких случаях используются нечеткие формулировки:

а) «теория деформаций сдвига первого порядка» (с англ. “first-order shear deformation theory”), требует замены, по крайней мере, на «сдвиговую теорию первого порядка»;

б) «кривизны панели определяются прогибом...» – более точно –

изменения кривизны, что приводит к разночтениям, так как при учете трансверсального сдвига в виде независимых кинематических переменных изменение кривизны определяется не только прогибом.

2. Требуется исправление неудачного представления формулы (73) – приведение к виду $P = a \setminus b$ с дальнейшим раскрытием числителя и знаменателя, где многострочный вид формулы вполне естественен, тогда как в составе дроби некорректен.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и не ставят под сомнение квалификацию автора.

**Заключение о соответствии диссертации критериям,
установленных Положением о порядке присуждения учёных степеней**

Диссертация Корольского Владислава Валентиновича «Метод оптимального проектирования конструктивно анизотропных панелей несущих поверхностей летательных аппаратов из композиционных материалов с ограничениями по устойчивости на основе уточнённой теории», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. – «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов», является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача, имеющая важное значение для авиационной промышленности, получены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение весовой эффективности несущих поверхностей летательных аппаратов из современных композиционных материалов.

По научной и практической ценности, значимости полученных автором результатов для развития авиационной отрасли диссертация Корольского В.В. соответствует критериям, в том числе, - требованиям пп. 9 – 14 Положения ВАК о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842. Автор диссертации, Корольский

Владислав Валентинович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. - «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук
Профессор кафедры теории пластичности
механико-математического факультета

Б.Н. Федулов

Подпись официального оппонента
Б.Н. Федулова заверяю
декан механико-математического
факультета член-корреспондент
РАН, профессор

17.11.25

Андрей Игоревич Шафаревич



Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

+7 (495) 939-10-00

E-mail: info@rector.msu.ru

Сотзывает означенн  Корольук В.В.
26.11.25.