

УТВЕРЖДАЮ

и генерального
е ФАУ «ЦАГИ»,
аук. доцент

М.Ч. Зиченков

_____ 2025г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Тереховой Елены Сергеевны

«Рациональное проектирование панелей из слоистого композиционного материала по условиям прочности и устойчивости»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Актуальность темы исследования

Современный этап развития авиационной техники связан с широким внедрением полимерных композиционных материалов в силовые элементы планера летательных аппаратов. Одним из основных элементов конструкции планера являются подкрепленные стрингерные панели. Весовая эффективность применения в них композита базируется на рациональном выборе их геометрических и жесткостных параметров, учитывающих имеющиеся ограничения по прочности и устойчивости. Для панелей из изотропных материалов проблема выбора рациональных параметров достаточно хорошо проработана и обеспечивает их высокую весовую отдачу. Для панелей, выполненных из композита, эта проблема все еще остается мало изученной областью и требует разработки новых подходов и методов оптимального проектирования таких конструкций. В связи с этим диссертационная работа Тереховой Е. С., посвященная вопросам выбора рациональных параметров композиционных панелей, обеспечивающих минимальный вес, является актуальной и своевременной.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 145 наименований и трёх приложений. Общий объём основной части составляет 140 страниц и включает 56 рисунков и 38 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, обозначена научная новизна и практическая значимость работы, а также текущий уровень разработанности проблемы в литературе.

В главе 1 представлена историческая справка о развитии науки об устойчивости конструкций, обзор методов оптимизации и основные подходы к проектированию композитных панелей. Рассмотрен ряд работ по выбору рационального расположения слоёв в укладке панели с ограничениями по прочности, устойчивости и жёсткости.

В главе 2 приведено аналитическое решение для оценки прочности и устойчивости неподкреплённых и стрингерных панелей, нагруженных продольными, поперечными и сдвиговыми потоками. Проведены верификация аналитического

определения критических нагрузок потери устойчивости и сравнение с результатами конечно-элементного анализа. Исследовано влияние различных функций формы на критические нагрузки панели.

В главе 3 представлен алгоритм выбора укладки, минимизирующей массу панели при удовлетворении условиям прочности и устойчивости. Результаты работы алгоритма сравниваются с данными, опубликованными ранее отечественными и зарубежными авторами, и результатами применения генетического алгоритма, реализованного в программном обеспечении Siemens NX 12. Для неподкреплённых панелей получено хорошее совпадение. Для стрингерных панелей сравнение с другими источниками невозможно из-за отсутствия соответствующих данных. Представлена программа для реализации алгоритма с примерами ввода и вывода данных.

В главе 4 представлены результаты экспериментального исследования образцов стрингерных панелей на сжатие. Результаты испытаний сравниваются с результатами конечно-элементного анализа. Исследовано влияние технологических факторов на толщину панелей. Установлено, что в процессе отверждения толщина панелей уменьшается на 4–10% при автоклавном формовании, что существенно влияет на устойчивость. При вакуумном формовании толщина некоторых образцов может увеличиваться после отверждения. Влияние компоновки слоёв в укладке на толщину панелей несущественно.

В главе 5 приведён анализ влияния на несущую способность и массу панелей из слоистых композитов различных конструктивных параметров (установка стрингеров, использование сбалансированной укладки по сравнению с несбалансированной укладкой, базисов с углами армирования $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ и $\pm 75^\circ$, укладки типа double-double).

В заключении приведены выводы по результатам диссертационной работы.

Основные научные результаты и их значимость для науки и практики

Разработан алгоритм подбора оптимальных параметров композитных пластин и стрингерных панелей. При проектировании панелей из слоистого композита представленный в работе алгоритм позволяет определить количество слоёв, их ориентацию и порядок расположения в композиционном пакете. При этом учитываются не только ограничения по прочности, но и по устойчивости.

Алгоритм реализован в виде программного обеспечения, которое позволяет выбирать параметры панелей из слоистого композита, обеспечивая минимальную массу и максимальную мембранную жёсткость панелей. Для ускорения работы алгоритма были получены аналитические решения задачи устойчивости композитных панелей без и со стрингерами.

Выполнены экспериментальные исследования несущей способности стрингерных панелей из полимерного композиционного материала ACM102C130UD.

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина» (ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»), при проектировании панелей отъёмной части крыла учебно-тренировочного самолёта «Танго» в ООО «Проект Виктори» (входит в S7 Group) и в

учебном процессе на факультете летательных аппаратов Новосибирского государственного технического университета (ФЛА НГТУ).

Новизна исследования и полученных результатов

1. Разработан алгоритм для определения рациональных параметров неподкреплённых и стрингерных панелей из композиционного материала, нагруженных продольными, поперечными и сдвиговыми потоками при ограничениях по прочности и устойчивости.
2. Получено аналитическое решение задачи устойчивости подкреплённой панели с учётом дискретного расположения и деформирования стрингеров, что позволяет учитывать их изгибно-крутильную потерю устойчивости при избыточном увеличении высоты стрингерного набора.
3. Получены результаты исследования влияния на массу и несущую способность конструктивных параметров панелей из слоистых композиционных материалов (использование сбалансированной и несбалансированной укладок композитного пакета, применение в укладках слоёв с различными углами армирования и отклонения толщин, связанных с допусками при поставке препрегов и усадкой при отверждении изделий из полимерных композиционных материалов).

Достоверность и апробация результатов

Научные положения, выносимые на защиту, и полученные в работе выводы представляются обоснованными, поскольку базируются на применении апробированных методов расчёта на прочность конструкций ЛА. Разработанные методики прошли валидацию сравнением с численными и экспериментальными результатами исследований, проведенными в ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина». Основные результаты работы доложены на российских и международных научных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Замечания по диссертационной работе

В качестве замечаний по диссертационной работе стоит отметить следующее:

1. Для предлагаемого в работе аналитического метода решения задачи устойчивости подкреплённой панели не приведена область верификации метода, внутри которой решения считаются приемлемыми и надежными, а также не сформулированы принятые при формировании математической постановки задач ограничения и упрощения. Область верификации метода представляет собой дополнительные ограничения, которые вводятся в формулировку задачи оптимизации панели для избегания недостоверных результатов расчёта в процессе решения.
2. В качестве упрощения автор полагает, что нейтральная ось стрингеров расположена по линии их контакта с обшивкой. Это предположение имеет место для тех подкреплённых панелей, в которых основной вклад в изгибную жёсткость панели вносит обшивка, а не стрингерный набор. Для обеспечения корректности решения задачи устойчивости для широкого диапазона конструктивных параметров панели следует учитывать компоненты энергии

деформирования системы, обеспечивающие условия совместности продольных деформаций стрингеров и обшивки по линии их контакта (в случае эксцентричного расположения стрингера относительно обшивки).

3. Одна из составляющих научной новизны работы заключается в том, что аналитическое решение задачи устойчивости позволяет учитывать изгибно-крутильную потерю устойчивости стрингера. При этом в работе не приведены результаты, демонстрирующие правильность и достоверность подхода по учёту этой формы потери устойчивости.
4. В силу большого числа формул и введения своих обозначений, желательно ввести в рукопись раздел «Список сокращений и условных обозначений».
5. В формулах 2.2–2.4 предполагается, что коэффициенты Пуассона ν_{zx} , ν_{yz} равны и обозначаются ν_z , что не справедливо для рассматриваемых однонаправленных углепластиков. Требуется пояснение для выполнения такого упрощения.
6. Из текста работы не ясно, деформационный критерий прочности $\varepsilon_i \leq \varepsilon_{ib}$ применяется к монослою или ко всему пакету в целом.
7. Рекомендуются заменить термины «фактор устойчивости» и «панель без подкрепления» на «собственное значение задачи устойчивости» и «анизотропная пластина» соответственно, для повышения точности и ясности изложения.
8. Предлагаемая методика предполагает равенство толщины обшивки и стрингера, что значительно сужает область её практического применения и требует дополнительного обоснования.
9. Результаты исследований, представленные в работе и касающиеся коробления панелей, выходят за рамки основной темы диссертации и могут быть отнесены к смежным вопросам.
10. Раздел 3.3, посвящённый программной реализации предлагаемой методики, рекомендуется дополнить описанием ключевых функциональных модулей и общей блок-схемой программного обеспечения.

Соответствие паспорту специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов» в части пунктов 2 — «Обеспечение прочности объектов авиационной, ракетной и космической техники на основе современных аналитических и численных методов, методов натурного и полунатурного моделирования в условиях стационарных и нестационарных внешних воздействий» и 6 — «Организация, экономика и оптимизация процессов обеспечения прочности, термopрочности и тепловых режимов летательных аппаратов».

Заключение

Общая оценка выполненной соискателем работы является положительной. Представленные замечания носят рекомендательный характер.

Диссертационная работа Тереховой Елены Сергеевны «Рациональное проектирование панелей из слоистого композиционного материала по условиям прочности и устойчивости» представляет собой завершённое научное исследование, имеющее научную ценность и практическую значимость. Полученные результаты

способствуют развитию методов рационального проектирования тонкостенных авиационных конструкций из композиционных материалов.

Выводы по диссертации являются достаточно полными, логичными и обоснованными. Текст диссертации написан корректным научно-техническим языком. Материалы диссертации полностью отражены в статьях, опубликованных в журналах из списка Высшей аттестационной комиссии (ВАК), а также представлены в материалах конференций.

Диссертационная работа Тереховой Е.С. по актуальности, объёму выполненных исследований, новизне, достоверности, научной и практической значимости полученных результатов и выводов удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, соответствует критериям, установленным пунктами 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842.

Соискатель Терехова Елена Сергеевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Отзыв подготовлен и рассмотрен на заседании отделения «Статической и тепловой прочности летательных аппаратов», принят на заседании научно-технического совета ФАУ «ЦАГИ» по прочности (выписка из протокола № 8 от 17.11.2025 г.).

Начальник отдела № 3
отделения «Статической и тепловой
прочности ЛА», канд. техн. наук

Научный сотрудник отделения
«Статической и тепловой прочности ЛА»

И.о. председателя НТС ФАУ «ЦАГИ» по
прочности

Секретарь НТС ФАУ «ЦАГИ» по
прочности

Ю.И. Дударьков

А.М. Зайцев

М.В. Лимонин

С.И. Елеонский

«17» ноября 2025 г.

Тел.: +7 (495) 556-43-03

e-mail: Aleksandr.dzuba@tsagi.ru

Наименование организации: Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»).

Почтовый адрес: 140180, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.

Телефон: +7 (495) 556-43-03. **Электронная почта:** info@tsagi.ru. **Сайт:** tsagi.ru

Получено в печать 03.12.2025
Согласовано 05.12.2025 Терехова Е.С.