

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Тереховой Елены Сергеевны

«Рациональное проектирование панелей из слоистого композиционного материала по условиям прочности и устойчивости», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической задачи — разработке алгоритма проектирования композитных панелей минимального веса с учётом требований прочности и устойчивости. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения массы авиационных конструкций при сохранении их несущих способностей.

Особое внимание заслуживают тонкостенные элементы конструкций, главным критерием несущей способности которых является устойчивость. При проектировании подобных конструкций необходимо учитывать ориентацию армирующих волокон, порядок укладки слоёв и характеристики стрингерного набора для подкреплённых панелей. Изменение в расположении отдельных слоёв может кардинально повлиять на несущую способность конструкции, что значительно усложняет поиск оптимальных проектных решений.

Для упрощения процедуры выбора оптимальных параметров композитных элементов используются аналитические выражения для оценки прочности. Традиционные методы оценки устойчивости подкреплённых панелей, основанные на представлении стрингерного набора через усреднённые характеристики жёсткости, не позволяют корректно учитывать влияние местной потери устойчивости отдельных стрингеров. В работе получены аналитические выражения для определения критических нагрузок, учитывающие совместное деформирование обшивки и стрингеров, дискретное расположение стрингеров и их изгибно-крутильную форму потери устойчивости. На их основе создан численно-аналитический алгоритм выбора рациональных параметров панелей из слоистого композиционного материала. Таким образом, предложено решение важной научной задачи, которое позволит улучшить качество проектирования конструкций из композиционных материалов.

Анализ содержания диссертационной 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.

Введение содержит обоснование важности исследуемой темы, постановку целей и задач исследования, описание научной новизны и практической значимости полученных результатов. Представлен обзор современного состояния проблемы в научной литературе.

Первая глава посвящена историческому обзору развития теории устойчивости конструкций. В ней рассматриваются различные методы оптимизации авиационных конструкций, включая изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Проводится анализ существующих подходов и алгоритмов проектирования композитных панелей, выявляются их преимущества и ограничения.

Вторая глава содержит аналитические выражения для оценки прочности и устойчивости композитных панелей. Оценка прочности композитного пакета основана на критерии максимальной интенсивности деформаций в условиях плоского напряжённого состояния. Для расчёта критических нагрузок применяется энергетический подход. Разработанные аналитические выражения учитывают взаимное влияние деформирования обшивки и стрингеров. Приведено сравнение полученных аналитических решений с результатами численного моделирования при помощи метода конечных элементов, показавшее хорошее соответствие результатов численного и аналитического решений.

Третья глава описывает разработанный алгоритм выбора рациональных параметров (АВРП) композитных панелей. Целью выбора является минимизация массы конструкций при соблюдении требований прочности и устойчивости. Оптимизационные расчёты выполняются для симметричных по толщине композитных укладок с применением метода покоординатного спуска.

Разработанный алгоритм обеспечивает получение оптимальных решений с точки зрения массы и жёсткости, учитывая технологические ограничения и требования к сбалансированности для предотвращения коробления композитных панелей.

Проведено сравнение результатов работы АВРП с данными из российских и зарубежных источников, а также с результатами, полученными с помощью генетического алгоритма в среде Siemens NX 12. Достигнуто хорошее соответствие полученных результатов.

Разработанный алгоритм реализован в виде консольного приложения на языке программирования Fortran90. Программа зарегистрирована в установленном порядке (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680522 от 02.10.2023).

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям несущей способности панелей, спроектированных с использованием АВРП. Результаты показали хорошее соответствие теоретических прогнозов и проведённых испытаний. Расхождение наблюдалось только в случае образца, имевшего заметное начальное коробление.

В рамках исследования изучено влияние различных факторов на коробление композитных панелей, таких как симметрия укладки, сбалансированность армирования и количество слоёв в пакете. Проведены исследования влияния технологических аспектов на толщину композитных панелей. В зависимости от технологии изготовления и партии материала толщина готового изделия может иметь разброс $\pm 15\%$, что существенно для тонкостенных конструкций, потеря несущей способности которых связана с потерей устойчивости. Установлено, что для рассмотренных панелей при уменьшении фактической толщины монослоя относительно паспортного значения происходит снижение критической нагрузки на величину от 2 до 40 %. Это необходимо учитывать при проектировании композитных конструкций для обеспечения их надёжности и работоспособности.

В пятой главе представлен анализ влияния установки стрингеров и процедуры балансировки армирующей укладки, производимой для исключения коробления ламината, на толщину и несущую способность панелей. Кроме этого, исследовано влияние на массу и несущую способность многослойных композитных панелей замены углов укладки волокон $\pm 45^\circ$ в классическом базисе $\{\pm 45^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$ на углы $\pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 60^\circ$ и $\pm 75^\circ$.

Также исследовано влияние на несущую способность укладки типа double-double (DD), которая представляет собой набор повторяющихся базовых четырёхслойных ламинатов $[\pm\phi/\pm\psi]$ или $[\phi/-\psi/-\phi/\psi]$. Это исследование показало, что укладки типа DD дают такие преимущества, как однородность мембранных свойств, предсказуемость изменения жёсткостей, удобство монтажа и ремонта. Однако толщина панелей при такой укладке на 2–10 % больше по сравнению с симметричными укладками, а прогибы при короблении в несколько раз выше. Негативной чертой укладок такого типа являются возникающие при короблении прогибы, которые уменьшаются при увеличении толщины панели, а также тот факт, что для панелей с симметричной укладкой заметный прирост прогиба появляется только вблизи критической нагрузки, тогда как у панелей с несимметричной укладкой – с начальных стадий нагружения.

В заключении приведены основные результаты работы, изложены дальнейшие планы по развитию темы исследований.

Оценка научной новизны

Научная новизна работы заключается в:

- разработке оригинального численно-аналитического алгоритма выбора рациональных параметров композитных панелей;
- получении аналитических решений для оценки устойчивости подкреплённых панелей с учётом дискретного расположения стрингеров;
- определении влияния различных конструктивных параметров композитных панелей на их несущую способность.

Практическая значимость

Создано программное обеспечение для реализации разработанного алгоритма выбора рациональных параметров панелей из слоистых композитов, с помощью которого можно определять оптимальную схему укладки композиционного материала и рассчитывать оптимальное количество и высоту стрингеров для обеспечения минимальной массы конструкции при заданных ограничениях по прочности и устойчивости.

Проведён анализ влияния различных конструктивных факторов на массу и несущую способность композитных панелей: сравнение сбалансированных и несбалансированных схем укладки, исследование эффективности применения слоёв с разными углами армирования, оценка влияния отклонений толщины материала, связанных с технологическими допусками при производстве препрегов и усадкой при отверждении.

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в 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.

Степень достоверности работы

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных методов расчета композитных конструкций, сравнением с данными других авторов, результатами численного моделирования в конечно-элементных пакетах и экспериментальными исследованиями на специально изготовленных образцах. Публикации в рецензируемых научных журналах подтверждают обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Результаты диссертационной работы апробированы на научных конференциях и опубликованы в 12 работах, в числе которых 4 статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК, и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Результаты диссертации в публикациях отражены достаточно полно.

Соответствие паспорту заявленной 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, термopочности и тепловых режимов летательных аппаратов».

Оценка изложения материалов диссертации и автореферата

Материал, изложенный в диссертации, понятен, логичен, хорошо структурирован. Проведенные исследования можно считать завершёнными. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. На стр. 62 присутствует неопределённая формулировка: «...когда температура материала повышается, эпоксидная смола переходит из стеклообразного состояния в эластичное.» — переход происходит, конечно, не просто при повышении температуры, а при достижении определённого её значения.
2. В п. 4.2.3. в начале сказано: «...при переходе от контактного формования к безавтоклавным методам получения композитных деталей (вакуумная инфузия, вакуумное формование) происходит наиболее резкое уменьшение толщины», однако далее на рис. 4.18 мы видим, что, напротив, у всех образцов, полученных вакуумным формованием, толщина больше, чем у автоклавных. Чем объясняется это противоречие?
3. Представление результатов в виде многочисленных объёмных таблиц существенно затрудняет их восприятие. Жаль, что нет представления содержимого этих таблиц в каком-либо графическом виде, позволяющем быстро сравнивать разные случаи и, в том числе, идентифицировать возможные закономерности. К тому же в таблицах в разных разделах диссертации даже внутри одной главы используются три разных стиля записи схемы укладки (один — разноцветный с указанием ориентации каждого слоя, трудно воспринимаемый при многократном повторении одинаковых слоёв, другой — более удобный и компактный, с указанием числа повторяющихся слоёв с одинаковой ориентацией, также разноцветный, и третий — такой же, но монохромный), что придаёт тексту излишнюю разнородность.
4. Раздел 5.2 заканчивается абзацем «Таким образом, установка стрингеров является эффективным способом снижения массы панелей при сохранении их несущей способности. Количество необходимых стрингеров зависит от размеров панели и нагрузки.», который выглядит как вывод из исследования, но оба его предложения являются констатацией очевидных фактов.
5. В разделе 5.4. в нескольких случаях говорится, что базисы $\{\pm 15^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$ и $\{\pm 75^\circ; 90^\circ; 0^\circ\}$ требуют большей толщины пластины, но зато обеспечивают повышенную мембранную жёсткость пластины. Возможно, повышенная жёсткость обеспечивается не базисом, а является простым следствием повышенной толщины? Также вызывает вопрос, насколько имеет смысл принимать во вни-

мание влияние укладки на мембранную жёсткость в тех случаях, когда разница значений этой жёсткости составляет одну-две тысячных процента, ведь разница характеристик композитных изделий, как правило, значительно выше даже при полном совпадении состава и характеристик структуры?

Указанные замечания и недостатки не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы.

Заключение

Представленная диссертация Тереховой Елены Сергеевны «Рациональное проектирование панелей из слоистого композиционного материала по условиям прочности и устойчивости» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научные и практические результаты, которые могут быть использованы при проектировании авиационных конструкций из ПКМ. Диссертация полностью соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ (Постановление Правительства № 842 от 24 сентября 2013 г.), а её автор – Терехова Елена Сергеевна – заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела, член-корреспондент Российской академии наук, профессор Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории моделирования гетерофазных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук».

«20» ноября 2025 г.

Карпов Евгений Викторович

Почтовый адрес: пр. Академика Лаврентьева, д. 15., г. Новосибирск, Россия, 630090.

Телефон: +7 (383) 333 16 12.

Присутств. в совет 02.12.2025 
Согласовано 02.12.2025 Терехова Е.С.