

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу Александра Андреевича Больших на тему «Методика проектирования толстостенного композитного кессона крыла широкофюзеляжного дальнемагистрального самолёта с учетом дефектов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13 «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов»**

Диссертационная работа Больших А.А. посвящена разработке методики проектирования толстостенного композитного кессона крыла широкофюзеляжного дальнемагистрального самолёта с учётом дефектов. Предложена методика параметрической оптимизации толщин и шага стрингеров толстостенного композитного кессона крыла широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета с учетом ограничений по статической прочности и потере устойчивости с учетом дефектов.

### **Актуальность темы диссертации**

Сегодня трудно найти области технических систем, где не используются композитные материалы. Авиастроение лидирует по скорости их внедрения. По всему миру композитные материалы активно применяются в силовых и конструктивных элементах самолетов, включая широкофюзеляжные дальнемагистральные авиалайнеры. Главная особенность таких самолётов заключается в использовании панелей значительной толщины в кессонах крыльев, что осложняет процессы сертификации и расчета. При больших толщинах классическая теория пластин оказывается неприменимой, так как она не учитывает высокие значения нормальных и сдвиговых напряжений, возникающих в этих конструкциях.

Современный подход к обеспечению прочности основан на классификации повреждений, возможных при эксплуатации, на пять категорий. К первой категории относятся повреждения, которые могут остаться незамеченными при плановых осмотрах. Согласно рекомендательному циркуляру АС 20-107В, такие повреждения могут появляться как в процессе эксплуатации, так и в результате производственных дефектов. Поверхности летательных аппаратов особенно подвержены этим

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ  
02.12.2024 г.

повреждениям. В рамках данной классификации конструкции с такими повреждениями должны выдерживать расчетные нагрузки на протяжении всего проектного ресурса. Поэтому необходимо надежно определять уровень ударной нагрузки, который приводит к повреждениям первой категории, как на этапе проектирования, так и в ходе эксплуатации. Это критично для проектирования конструкций, выбора свойств композитных материалов, толщины и схем укладки. Для решения этих задач требуются дополнительные расчеты, расчетно-экспериментальные, эмпирические и аналитические исследования, а также разработка методики проектирования толстостенного композитного кессона крыла широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета с учетом возможных дефектов.

Разработка методики проектирования композитного кессона крыла для широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета, учитывающей наличие дефектов и ограничение по статической прочности, а также устойчивость при действии сжимающих и касательных потоков с учетом деформаций поперечного сдвига, представляет собой актуальную задачу.

Вышесказанное подчеркивает научную и практическую актуальность данного диссертационного исследования.

### **Новизна научных результатов**

Перечень новых научных результатов, полученных автором, довольно широк. Основным результатом является разработанная методика параметрической оптимизации толщины и шага стрингеров кессона крыла широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета с учетом ограничений по деформациям на сжатие и растяжение, а также потере устойчивости при сжимающих и сдвигающих нагрузках и с учетом дефектов, вызванных низкоскоростными ударными воздействиями. Предложенная автором методика позволила сократить массу конструкции кессона на 8...15 % при сохранении прочностных и жесткостных характеристик толстостенного композитного кессона. Судя по представленному анализу публикаций, работы в данном направлении для толстостенных композитных панелей в открытой печати практически отсутствуют.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследования**

Разработана аппроксимация, учитывающая численные решения задачи устойчивости толстых композитных панелей под сдвиговыми нагрузками с учетом деформаций поперечного сдвига, что дополняет существующую методологию проектирования ортотропных панелей на потерю устойчивости при сжатии. Создана методика для определения уровня деградации упругих свойств толстых композитных панелей под воздействием низкоскоростных ударов, также дополняющая существующие подходы к проектированию ортотропных панелей на устойчивость при сжимающих и сдвигающих нагрузках. Реализована возможность оптимизации параметров толстых ортотропных композитных панелей с учетом дефектов на ранних этапах проектирования, где в качестве переменных выступают толщина и ширина панелей, а также шаг стрингеров при заданных погонных нагрузках.

Результаты работы могут быть применены на предприятиях, выпускающих летательные аппараты взлетной массой до 260 тонн, с использованием полимерных композиционных материалов в конструктивно-силовых элементах планера.

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников.

Во введении диссертантом приведены стандартные разделы, посвященные формулировке цели, задач, актуальности рассмотренных в диссертации задач, сформулированы научная новизна и обоснованность результатов.

В первой главе диссертации представлен обзор современных проблем, связанных с проверочными расчетами статической прочности и проектированием толстостенных композитных панелей с учетом дефектов.

Во второй главе изложена методика проектирования толстостенного композитного кессона крыла широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета, учитывающая дефекты, ограничения по статической прочности и устойчивости при действии сжимающих и сдвиговых нагрузок, а также с учетом деформаций поперечного сдвига.

Третья глава содержит результаты разработки и апробации методики численного моделирования низкоскоростных ударных воздействий на композитные панели кессона крыла, выполненные для больших толщин.

Представлены результаты сравнительного анализа математической модели полимерного композиционного материала, учитывающей трехмерное напряженно-деформированное состояние при ударных воздействиях, и расчетно-экспериментального исследования панелей с дефектами, а также подход к моделированию дефектов 1-й категории.

В четвертой главе исследуется влияние низкоскоростных ударов на остаточную прочность и критическую силу потери устойчивости толстых панелей кессона крыла с учетом деформаций поперечного сдвига. Также представлены результаты расчетов устойчивости композитных ортотропных панелей под сжимающими и сдвиговыми нагрузками, а также эмпирические данные по устойчивости панелей с учетом дефектов.

Пятая глава включает методику параметрической оптимизации толщины и шага стрингеров крыла широкофюзеляжного самолета, с ограничениями по деформациям и условиям устойчивости при сжатии и сдвиге с учетом дефектов 1-й категории и деформаций поперечного сдвига.

В заключении работы приведены основные результаты и обозначены перспективы дальнейших исследований по теме диссертации.

#### **Замечания по работе**

1) Во второй главе рассмотрено математическое моделирование многослойного композита, подвергающегося воздействию низкоскоростного удара. При этом используются и сравниваются три критерия разрушения – Хашина-Пака, трехмерный критерий Хашина и упругопластическая нелинейная модель материала, встроенная в применяемый для расчета программный комплекс. В третьей главе рассматривается расчет удара по подкрепленной панели с ее последующим сжатием для определения остаточной прочности. При этом не указано, какой именно критерий (Хашина-Пака или трехмерный критерий Хашина) использовался при расчете.

2) В разделе 3.1.2 приведены результаты испытаний при сжатии двухстрингерной панели крыла широкофюзеляжного самолета после нанесения низкоскоростных ударных повреждений энергией 140 Дж в межстрингерной зоне. При этом не приведены данные о несущей способности аналогичной панели с отсутствием ударных повреждений. В связи с этим остается неясным, насколько указанные повреждения снижают прочность конструкции.

3) Недостаточно четко описана разработанная методика параметрической оптимизации толщин и шага стрингеров толстостенного композитного кессона крыла широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета – не вполне ясно, какая была целевая функция, ограничения, каким методом проводилась оптимизация.

4) Остался открытым вопрос о возможности использования полученной в ходе исследования методики по определению уровня деградации упругих свойств композитных панелей больших толщин под воздействием низкоскоростных ударных воздействий при расчетах на статическую прочность.

В целом, несмотря на имеющиеся погрешности, работа представляет серьезное и обширное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Практически все полученные результаты являются новыми. Результаты диссертации достаточно полно опубликованы в ведущих научных журналах и изданиях (всего 5 печатных научных работ, в том числе две статьи в журнале, рекомендованном ВАК для рассматриваемой научной специальности).

Результаты исследований апробированы на профильных всероссийских и международных конференциях (6 докладов).

Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследований. Публикации также отражают основные положения диссертации

### **Заключение**

Больших А.А. решил актуальную и практически важную научную задачу: разработал методику проектирования толстостенного композитного кессона крыла широкофюзеляжного дальнемагистрального самолета с учетом дефектов при ограничениях по статической прочности и по устойчивости, а также сжимающих и сдвиговых нагрузках с учетом деформаций поперечного сдвига. Таким образом, данная диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержатся методики решения задач, имеющих большое значение для развития широкофюзеляжных дальнемагистральных самолетов в области гражданской авиации.

Диссертационная работа Больших Александра Андреевича на тему «Методика проектирования толстостенного композитного кессона крыла широкофюзеляжного дальнемагистрального самолёта с учетом дефектов» соответствует всем требованиям п.9 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Считаю, что ее автор Больших Александр Андреевич, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.13 «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».

Официальный оппонент, главный научный сотрудник АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения», доктор технических наук по специальности 2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки)

25.11.2024

Азаров Андрей Валерьевич

Полное наименование организации:

АО «Центральный Научно-исследовательский институт специального машиностроения» (АО «ЦНИИСМ»).

Почтовый адрес организации: Россия, 141371, Московская область, Сергиево-Посадский г.о., г. Хотьково, ул. Заводская, д.34.

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»:  
<https://www.tsniism.ru>

Адрес электронной почты организации: [tsniism@tsniism.ru](mailto:tsniism@tsniism.ru)

Телефон: +7(495)993-00-11, Факс: +7(496)543-82-94

Подпись Азарова Андрея Валерьевича заверяю

Секретарь НТС АО «ЦНИИСМ»



Г. В. Краснова

С одобрением / 02.12.2024