



**САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086  
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36  
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru  
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,  
ИНН 6316000632, КПП 631601001

23 НОЯ 2021 № 104-6049

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«Утверждаю»

Первый проректор – проректор  
по научно-исследовательской работе  
Самарского университета  
доктор технических наук, доцент  
А.Б. Прокофьев  
\_\_\_\_\_ 2021 г.



### Отзыв

#### ведущей организации

федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования

**«Самарский национальный исследовательский университет имени  
академика С.П. Королева» (Самарский университет)**

**на диссертационную работу**

**Пеленева Константина Александровича**

**«Напряженно-деформированное состояние и прочность шпангоута  
авиационного двигателя из полимерных композиционных материалов»  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела**

**Актуальность и степень разработанности темы исследования** определяется современной тенденцией по увеличению объема использования полимерных композиционных материалов в ответственных высоконагруженных деталях и узлах авиационной и ракетной техники. В настоящее время доля использования материалов в авиационных конструкциях доходит до шестидесяти и более процентов. В конструкции двигателей этот показатель значительно ниже и пока, в основном, ограничивается конструкциями лопаток вентилятора и капота. Вопросам проектирования силовых конструкций двигателя с учетом их специфики в научной литературе посвящено ограниченное количество публикаций. В диссертации рассматривается конкретный высоконагруженный элемент конструкции двигателя из композиционного материала, однако обладающего рядом общих характерных особенностей, связанных с анизотропией



композитов. По своей сути работа в целом направлена на разработку расчетно-экспериментальных методик обоснованного и эффективного использования композиционных материалов в конструкциях двигателей. Данное направление представляется безусловно актуальным.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, который содержит 135 наименований. Объем диссертационной работы изложен на 149 страницах иллюстрированных 83 рисунками и 17 таблицами.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и основные задачи работы. Определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** приводится обзор научно-технической литературы, посвященной применению крупногабаритных силовых шпангоутов в конструкциях авиационной и ракетной техники. Обсуждаются возможные конструкторско-технологические схемы шпангоутов авиационного двигателя, перспективные для замены металлических конструкций на композитные. Обсуждаются материалы, технологии изготовления и возможные схемы армирования конкретного композитного шпангоута. Обосновывается выбор объекта и основных направлений исследования.

Во **второй главе** сформулирована задача расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) шпангоута авиационного двигателя и оценки его прочности. Проведен анализ эксплуатационных нагрузок, действующих на шпангоут, по результатам которого выбран наиболее опасный случай нагружения. Проведен расчет НДС шпангоута из титанового сплава на выбранные нагрузки и заданные условия опирания по методу конечных элементов (МКЭ) в САЕ-системе ANSYS.

В **третьей главе** рассматривается выбор композиционного материала и схем армирования рассматриваемого шпангоута. Для оценки деформаций и напряженного состояния композитного шпангоута со слоистой структурой с тканевым наполнителем используются две модели МКЭ – оболочечная с использованием элемента Schell 181 из библиотеки конечных элементов системы ANSYS и твердотельная с использованием элемента Solid 185. Оболочечная модель использовалась для расчета шпангоута как единого целого. Твердотельная – для расчета сегмента шпангоута, нагруженного только заданием кинематических граничных условий по границам сегмента из расчета всего шпангоута в целом по оболочечной схеме. Межслоевая прочность шпангоута оценивалась по результатам расчета его сегмента. Рассмотрено более 10 вариантов схем армирования и выбрана наилучшая по мнению диссертанта схема. На основе выполненных расчетов определены избытки прочности и сделаны выводы о работоспособности композитного шпангоута. По результатам расчетов



в третьей главе делается вывод, что выбранные материалы и схемы армирования позволяют обеспечить прочность и жесткость композитного шпангоута, эквивалентные титановому аналогу.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям механических характеристик и прочности композитного шпангоута. Разработаны методики и специальные оснастки для проведения натурных испытаний сегментов шпангоута с двумя типами приложения нагрузки. Приводятся результаты расчетов экспериментального сегмента и натурных испытаний с использованием оригинальной оснастки и волоконно-оптических датчиков деформаций, работающих на принципиально новых физических эффектах по сравнению с традиционными. По результатам сравнения расчетных и экспериментальных данных проведена верификация разработанных математических моделей шпангоута и его сегмента в оболочечной и трехмерной постановках. Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных. При этом четко зафиксированы начало и последующие стадии разрушения сегмента шпангоута за счет расслоения композита под действием растягивающих (разрывных) усилий в трансверсальном направлении в местах перехода стенки шпангоута к полкам, которые названы в работе «фланцами», при их отгибе. Данная глава выгодно отличается от предшествующих четкостью поставленных задач и конкретностью сделанных выводов.

**В заключении** указаны основные научные результаты и выводы, полученные автором, из которых, по нашему мнению, можно выделить следующие:

- выявлено, что особенностью деформирования шпангоута реверсивного устройства авиационного двигателя с П-образным поперечным сечением является отгиб «фланца» под действием осевых нагрузок и вызванные этим разрушающие разрывные межслоевые напряжения внутри композита;

- выбраны полимерные композиционные материалы и схемы армирования для изготовления композитного шпангоута, которые обеспечивают ему необходимую прочность и жесткость, эквивалентные титановому шпангоуту, при сохранении геометрических размеров;

- разработаны методики экспериментального и расчетного исследования особенностей деформирования и разрушения композитного шпангоута. В соответствии с разработанными методиками проведены механические лабораторные испытания композитного шпангоута. По результатам сравнения расчетных и экспериментальных данных проведена верификация разработанных математических моделей шпангоута и его сегмента.

- опробовано применение системы волоконно-оптических датчиков для мониторинга текущего состояния композитного сегмента шпангоута в процессе



проведения лабораторных испытаний. Показано, что система волоконно-оптических датчиков, наклеенных на поверхности конструкции, регистрирует изменения деформированного состояния при появлении расслоений.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** связана с уникальностью объекта исследования и выявленными в эксперименте и в расчетах особенностями межслоевого разрушения композитного шпангоута при эксплуатационной и лабораторной нагрузках и способах фиксации начала разрушений с помощью датчиков деформаций нового типа.

**Достоверность полученных результатов** определяется сравнением расчетных и экспериментальных данных, полученных с использованием современного поверенного оборудования в аккредитованной испытательной лаборатории.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.**

*Теоретическая значимость* заключается в возможности учета выявленных особенностей деформирования шпангоута реверсивного устройства авиационного двигателя в процессе эксплуатации при его проектировании. *Практическая значимость* заключается в методиках оценки прочности композитных шпангоутов, в новых методиках проведения лабораторных механических испытаний с использованием системы волоконно-оптических датчиков, позволяющих проводить мониторинг состояния композитного шпангоута в режиме реального времени. Результаты исследований внедрены и используются при создании деталей и узлов из полимерных композиционных материалов новых авиационных двигателей в АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь) (имеется акт внедрения), в научно-образовательном центре акустических исследований и композитных звукопоглощающих конструкций ФГАОУ ВО ПНИПУ (г. Пермь).

#### **Апробация результатов работы.**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях. Результаты исследования достаточно полно представлены в 7 публикациях, из них 4 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и в изданиях, индексируемых в Scopus.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Объект исследования диссертации – шпангоут с П-образным поперечным сечением – представляет собой хорошо изученный и широко используемый в строительстве и в машиностроении профиль типа «швеллер», который состоит из «стенки» и «полок». Таким образом, в работе рассматривается, с точки зрения строительной механики, криволинейный стержень с открытым профилем поперечного сечения. Хорошо известная особенность стержня с таким профилем – расположение оси жесткости вне габаритного контура поперечного сечения, которая вызывает кручение такого стержня практически при любом нагружении и



опирании. Изложение материала в первых трех главах было бы намного понятнее и продуктивнее, если бы использовалась стандартная терминология и представление внутренних силовых факторов в шпангоуте – изгибающих и крутящих моментов, а также перерезывающих и осевых сил – в виде традиционных эпюр, которая используется при анализе шпангоутов в аэрокосмических конструкциях. Такое представление силовых факторов существенно облегчило бы выбор рациональной или даже оптимальной схемы армирования.

2. Предлагаемая в работе стыковка расчета полноразмерного шпангоута с использованием оболочечной модели с расчетом сегмента шпангоута путем задания только кинематических граничных условий по торцам сегмента без задания силовых граничных условий приводит практически к полной потере учета отгиба полки от стенки и практически к резкому падению отрывных и касательных межслойных напряжений в середине сегмента, что резко отличается от результатов расчетов, приводимых в четвертой главе (стр. 92-94, рис. 3.18 – 3.22).

3. В работе используются различные обозначения и расположение осей координат (рис. 1.12, 1.13). На рисунке 1.18 показаны два  $M_z$ , действующие в различных плоскостях.

4. В таблице 3.5 приводятся эффективные упругие характеристики слоистого углепластика без пояснения, каким образом получены (или откуда заимствованы) последние пять столбцов трудно определяемых в эксперименте величин.

5. В таблицах 3.6 и 3.7 приводятся упругие прочностные характеристики используемого в работе углепластика без указания температурного фактора, несмотря на то, что шпангоут расположен близко к горячей зоне двигателя.

6. Результаты исследования зависимости величины напряжений, вычисляемых по МКЭ (рисунок 3.13 с.85 и рисунок 4.21 с.125) от размеров элементов имеют научный и практический интерес. Однако описаны они крайне скупо. Возможно, что нагрузка прикладывалась в виде сосредоточенной силы в один узел, что порождает сингулярность и трудно объяснимый характер полученных результатов, которые порождают необходимость использования избыточно мелких сеток.

Высказанные замечания в известной мере снижают общее впечатление от выполненной сложной и актуальной работы. Однако, материалы, представленные в четвертой главе, решают поставленные в диссертации задачи и могут рассматриваться как достаточное основание для присуждения ученой степени кандидата технических наук.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней».**

Диссертация Пеленева Константина Александровича «Напряженно-деформированное состояние и прочность шпангоута авиационного двигателя из полимерных композиционных материалов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой исследуется влияние структуры слоистых композиционных материалов на напряженно-деформированное состояние шпангоута реверсивного устройства авиационного двигателя.

Диссертационная работа Пеленева К.А. соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв на диссертационную работу подготовлен профессором, доктором технических наук Комаровым В.А., обсужден и одобрен на очно-заочном заседании кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов и научно-образовательного центра авиационных конструкций (НОЦ-202) (протокол №5 от 11.11.2021г.).

Заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов,  
доктор технических наук, доцент  
Телефон: (846) 267-46-45  
E-mail: bolav@ssau.ru

Болдырев  
Андрей Вячеславович

Директор научно-образовательного центра авиационных конструкций (НОЦ -202)  
доктор технических наук, профессор  
Телефон: +7 (846) 267-46-50  
Email: vkomarov@ssau.ru

Комаров  
Валерий Андреевич

Подпись Болдырева АВ, Комарова ВА удостоверяю.

Начальник отдела сопровождения деятельности ученых степеней Самарского государственного университета

Васильева И.П.

20.21 г.