



# СУХОЙ

ГРАЖДАНСКИЕ САМОЛЕТЫ

Компания "Сухого" и "Аленин Аэрмакки"

Акционерное общество  
«Гражданские самолеты Сухого» (АО «ГСС»)  
ул. Поликарпова, 23Б корпус 2, Москва 125284, РФ  
тел: +7 (495) 727 1988, факс: +7 (495) 727 1983  
e-mail: info@scac.ru, http: www.scac.ru  
ИНН 7714175986 КПП 774850001 ОГРН 1027739155180

« 10 » февраля 2017 № 003-17-1237

на № \_\_\_\_\_

Ученому секретарю  
диссертационного совета Д 212.125.05,  
Федотенкову Г.В.

Уважаемый Григорий Валерьевич!

Направляю отзыв официального оппонента доктора технических наук Митрофанова О.В. на диссертацию **Нурымбетова Алибека Усипбаевича «Стержневые и полупространственные модели деформирования слоистых закрученных изделий в поле стационарных и нестационарных нагрузок»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Приложение: отзыв на 7 листах.

Зам.начальника НИО прочности-

Зам.Главного конструктора по прочности (  ) Митрофанов О.В.



## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук Митрофанова Олега Владимировича на диссертацию **Нурымбетова Алибека Усипбаевича «Стержневые и полупространственные модели деформирования слоистых закрученных изделий в поле стационарных и нестационарных нагрузок»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела»

**Актуальность темы**, которая посвящена исследованиям напряженно-деформируемого состояния (НДС) стержней с естественной закрученностью из композитных материалов (КМ), с учетом разработки уточненных моделей, в современных условиях не вызывает сомнений. Расширение области применения КМ, в частности, для лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), является следствием проведенной работы.

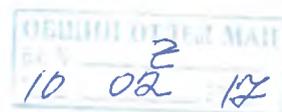
**Объектом исследования** в диссертации являются призматические многослойные анизотропные стержни, образованные из различных слоев линейно деформируемого анизотропного КМ, которые в поперечном сечении имеют произвольную конфигурацию и могут находиться под совместным действием растягивающих, изгибающих и крутящих моментов.

**Предмет исследования** в диссертации - математические модели механики для расчета НДС многослойных анизотропных сред; расчетная модель задачи о НДС многослойного анизотропного призматического стержня произвольного сечения при действии растягивающих сил, изгибающих и крутящих моментов и алгоритм его решения; расчётное и экспериментальное определение собственных частот и форм колебаний таких стержней.

**Общая характеристика диссертации.** Диссертация содержит 343 страниц текста, состоит из введения, 6-и глав и заключения, содержит 124 рисунка, библиографию из 259 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность и практическая значимость научной проблемы. Приведен обзор литературных источников по соответствующей проблематике. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы. Кратко изложены пути решения выявленных проблем, которые реализуются в последующих шести главах диссертации.

**В главе 1** рассматривается краткий обзор известных экспериментальных работ, посвященных изучению физико-механических характеристик КМ.



Представлен анализ расчетной модели КМ и методов определения упругих постоянных.

Приведена математическая модель расчета НДС предварительно закрученного многослойного стержня произвольного сечения, где перемещения любой точки слоя сечения определяются линейными и угловыми перемещениями и гипотезами о поведении выбранной характерной точке слоя, гипотезами о поведении сечения при деформировании многослойного стержня. Считая многослойный стержень достаточно длинным, принято, что объемные силы и нагрузки на поверхности приложенные по торцевым плоскостям приводятся к статически эквивалентной продольной силе  $P$ , изгибающим  $M_1$ ,  $M_2$  и крутящему моменту  $M_t$ . Стержень из КМ имеет многослойную структуру, поэтому в работе для него решена специфическая для армированных стержней задача об укладке в сечении слоев постоянной толщины.

На основе разработанной программы расчета о кручении многослойных призматических стержней прямоугольного сечения, составленного из ортотропных материалов, проведено исследование распределения касательных напряжений, перемещения в отдельных слоях и на поверхностях их контакта в зависимости от механических характеристик материала этих слоев.

Поскольку увеличение межслоевой прочности КМ является одним из основных способов обеспечения целостности и работоспособности стержней из КМ, проведен анализ, который позволяет дать оценку работоспособности анизотропной слоистой конструкций при кручении в целом в зависимости от напряженности отдельного слоя. Аналитическим путем установлена зависимость выражения жесткости на кручение от числа слоев, которая асимптотически стремится к пределу, характерному для однородного анизотропного стержня с эффективными параметрами упругости. Для тонкостенных многослойных стержней, работающих в условиях кручения, предложена номограмма для оценки их характеристик жесткости на кручение, что может быть эффективно использовано на этапах эскизного проектирования.

**В главе 2** представлено численное решение методом конечных элементов (МКЭ) задачи о кручении слоистых анизотропных стержней произвольного сечения.

В диссертационной работе рассмотрена задача о кручении стержней прямоугольного, ромбовидного сечения и сечения для компрессорной

лопатки. Приведено сравнение значений осевых перемещений прямоугольного и ромбовидного сечений, вычисленные МКЭ, с точными значениями.

Известно, что жесткость на кручение является важной интегральной характеристикой сечений многослойных стержней. Предложенный в диссертационной работе итерационный способ решения разрешающего уравнения в каждой узловой точке позволяет использовать только оперативную память ЭВМ, обеспечив одновременно необходимую точность решения поставленной задачи и увеличить практически без ограничения количество рассматриваемых узловых точек.

В главе 3 приведен подробный анализ исследований, посвященных закрученным изотропным стержням, а также проблема составных закрученных стержней, решения в которых не были доведены до уровня практического использования. Поэтому с помощью геометрических представлений для слоистых анизотропных стержней с прямолинейной осью получены кинематические соотношения, которые в последующем использованы для установления основных уравнений теории расчета закрученных анизотропных многослойных композиционных стержней при совместном действии кручения, изгиба и растяжения.

В этой главе приводится общая система дифференциальных уравнений для поставленной задачи. Получено четыре уравнения равновесия относительно четырех обобщенных силовых факторов. Рассмотрены задачи нелинейного поведения многослойного стержня, поперечное сечение которых предварительно повернуто на некоторый угол к осевой линии и нагружено совместным действием растягивающего осевого усилия, изгибающих и крутящего моментов. Приводятся результаты решения в явном виде для растяжения, кручения и изгиба многослойного стержня с начальной закруткой. Предложенная теория расчета указанных объектов позволяет также определять положение центра изгиба и оси начальной закрутки. Перемещения же любой точки многослойного сечения определяются линейными и угловыми перемещениями в выбранной характерной точке слоя и гипотезами о поведении сечения при деформировании стержня. Используются геометрически нелинейные соотношения, учитывающие деформации поперечного сдвига с учетом депланации. Задача в этой главе сформулирована в более общем виде, учитывающем нелинейные деформации, эффекты поперечных сил, деформации в плоскости сечения и температуры. Отличительной особенностью разрешающих уравнений для многослойного стержня является связанность, имеющих в стержне,

деформаций растяжения, изгиба и кручения в отличие от стержня из однородного изотропного материала.

Приведены результаты исследований НДС слоистой компрессорной лопатки в поле центробежных сил в 3-х сечениях, для трех различных вариантов сочетаний упругих постоянных в пакете слоев композиционной лопатки, соответствующих трем различным материалам. По результатам расчетов построено семейство кривых, отражающих зависимости деформации растяжения, растягивающего усилия от центробежной силы, осредненного напряжения, раскрутки и жесткости на кручение по Сен-Венану для каждого сечения. Численные исследования естественно-закрученных стержней из КМ, в условиях близких к рабочим условиям лопаток компрессоров, позволило выявить ряд особенностей распределения напряжений в армированных материалах, а также взаимосвязанность деформации растяжения и раскрутки при растяжении.

**В главе 4** приведены результаты численного решения определения НДС с помощью МКЭ для композиционной лопатки в пакете ANSYS и проведено сравнение с результатами расчета, полученными в третьей главе. По результатам расчетов построены изолинии распределения перемещений и напряжений по длине лопатки для спинки (выпуклая сторона сечения) и корытца (вогнутая сторона сечения). Показано, что численные результаты определения НДС композиционной лопатки с помощью пакета ANSYS совпадают с результатами расчета, проведенными в главе 3 для лопатки из однонаправленного боралюминия. На примерах показано, что путем выбора материала отдельных слоев или способа армирования в них можно в широких пределах управлять уровнями напряжений и деформаций при одних и тех же оборотах ротора.

**В главе 5** использованы основные вариационные принципы для решения задачи определения НДС в армированном слоистом теле в условиях динамического деформирования. Рассмотрены поперечные свободные колебания многослойного стержня произвольного сечения, изготовленного из КМ. Полученные расчетные соотношения устанавливают непосредственную зависимость собственных частот от упругих и динамических параметров отдельных компонентов композиции и позволяют путем их выбора управлять вибрационными характеристиками многослойного тела. Поэтому, использование теории слоистых армированных сред, при расчете элементов конструкций из КМ позволяет получить удовлетворительное совпадение с опытными данными.

Проведенный анализ путем выбора материала компонентов армированной слоистой среды дает возможность управлять собственными частотами колебаний деталей без изменения их геометрических размеров и формы, что важно в технических приложениях.

В работе предложен метод, использование которого на этапе эскизного проектирования лопатки позволяет решить задачу отстройки от зон возможных резонансов.

В главе 6 результаты предшествующих глав (3, 5) используются для определения собственных частот закрученных многослойных анизотропных стержней, находящихся в поле центробежных сил. Для проверки достоверности полученных соотношений приведено сравнение численных результатов, вычисленные по полученным соотношениям с известными решениями определения собственных частот.

Показано, что путем выбора материала с учетом армирования отдельных слоев можно в широких пределах управлять уровнями напряжений и деформаций и собственными частотами колебаний при одних и тех же оборотах ротора. Сравнение значений частот первых пяти форм колебаний, полученных в диссертационной работе, показало удовлетворительное совпадение с известными результатами других авторов.

В заключении диссертации сделан вывод, что предложенный аналитический алгоритм и разработанный пакет прикладных программ для расчета стержней слоистого сечения заданной конфигурации позволяет, исследовать особенности распределения напряжений и перемещений в отдельных слоях стержня произвольного сечения и показало возможность регулирования НДС слоистой конструкции путем назначения свойств отдельных слоев, обеспечивающих прочность стержня.

Диссертационная работа обладает **научной новизной**, которая заключается в следующем:

- разработана методика решения дифференциальных уравнений, позволяющая определить НДС в призматических телах при удовлетворении всех граничных условий на контактных поверхностях многослойных анизотропных тел, что позволило учитывать закономерности распределения касательных напряжений и перемещений;

- построен алгоритм определения жесткости на кручение слоистых анизотропных стержней произвольного сечения прикладная методика с использованием решения задачи кручения МКЭ;

- представлена математическая формулировка задача об определении НДС многослойных анизотропных призматических стержней произвольного сечения при действии растягивающих сил, изгибающих и крутящего моментов;

- получены основные соотношения для расчета НДС в композитных телах стержневого типа в поле центробежных сил;

- получены расчетные соотношения для определения собственных частот исследуемых тел.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обусловлена применением фундаментальных методов строительной механики конструкций из КМ.

**Практическая ценность.** Результаты, полученные в работе, представляют теоретическую и практическую ценность для расчета и проектирования многослойных анизотропных конструкций неоднородной структуры. Результаты разработанной комплексной программы внедрены в производства по изготовлению лопаток из КМ в ООО «Политермо» (г.Истра, Московская обл.) и получен инновационный патент и удостоверение автора №89798 (г. Астана, 2016 г. Министерства юстиции РК), разработанный комплекс расчетных программ зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности как «Программа для ЭВМ».

**Апробация работы.** Результаты работы, выносимые на защиту, опубликованы в 38 работах, среди которых 1 монография, 18 статей в рецензируемых изданиях ВАК РФ. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 18 международных, всероссийских конференциях и семинарах.

Следует отметить несколько недостатков диссертационной работы.

1. Результаты работы ограничены рамками этапов эскизного проектирования и рассмотрены только вопросы линейного определения НДС, вычисления жесткостных характеристик и анализа появления резонансных частот. Для придания большей практической значимости было бы целесообразно рассмотреть задачи соответствующие пунктам авиационных правил АП-33 (*нормы летной годности двигателей ВС*), связанные с требованиями по статической прочности и по ресурсу для ответа на вопрос об исчерпании несущей способности лопаток.

2. Определение упругих характеристик монослоя КМ по правилу смеси (см. п.1.3) при использовании объемного содержания материала матрицы и наполнителя – в авиации при проектировании конструкции

планера давно не используют. Как правило, характеристики монослоя КМ должны соответствовать статистически обоснованным минимальным значениям, определяемым путем многочисленных испытаний, и являются исходными данными для проектировщика – прочниста.

Автореферат полностью передает содержание и выводы диссертационной работы.

Отмеченные недостатки не влияют на общий научный уровень диссертационной работы Нурымбетова А.У., в которой решена крупная научная проблема, имеющая важное теоретическое и практическое значение в области моделирования многослойных анизотропных стержневых изделий произвольного сечения.

Диссертация полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор Нурымбетов Алибек Усипбаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Зам. Начальника НИО прочности–  
зам. Главного конструктора по прочности,  
д.т.н., доцент



Митрофанов О.В.

Подпись Митрофанова О.В. удостоверяю

Начальник отдела кадров



Егорова Т.А.