




125040, Москва, Ленинградский пр-т, д.7, стр.1  
тел. (495)946-18-06, 946-18-02; факс: (495)946-18-03  
e-mail: iam@iam.ras.ru

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Зам. директора ИПРИМ РАН  
по научной работе д.ф.-м.н.,  
профессор Данилин А.Н.

  
« 10 » 02 2017 г.

« 10 » 02 2017 г.

Исх. № 11509/23

## ОТЗЫВ

### ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

**НУРИМБЕТОВА Алибека Усинбаевича**

**«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»

### Общие сведения о диссертационной работе

На рассмотрение ведущей организации представлена диссертационная работа Нуриμβетова Алибека Усинбаевича объемом 343 страницы, включающая 124 рисунка, 22 таблицы, структурно подразделенная на введение, шесть глав, заключение, список литературы из 259 наименований и приложение объемом 251 страница, а также автореферат вышеозначенной диссертации.

Изучение диссертационной работы, автореферата и публикаций соискателя позволило сформулировать представленные ниже заключения.

#### 1. Актуальность темы диссертационной работы

Разработка ключевых элементов конструкций летательных аппаратов и их энергетических установок на основе композиционных материалов (далее КМ) представляется одним из перспективных направления развития авиационной

10 02 17

техники. В свою очередь, определение напряженно-деформированного состояния (далее НДС) многослойных композиционных стержневых изделий произвольного сечения с учетом внутренней структуры композиционного материала (далее КМ) является сложной задачей, требующей весьма значительных вычислительных ресурсов при применении сертифицированных программных комплексов вычислительного моделирования на базе метода конечных элементов. В ряде случаев попытки решения задачи подобных задач для многослойных стержневых элементов из КМ на основе конечно-элементных моделей редуцированной размерности, необходимых на ранних этапах проектирования изделий и использующих модели квазиоднородного КМ, привели к неадекватным результатам. Адекватное описание статического и динамического деформирования изделий такого класса при комбинированном температурном и силовом нагружении приближенными моделями даже в рамках линейной постановки задачи является одной из основных проблем теории слоистых анизотропных стержней. Соответственно, тема диссертационной работы представляется актуальной.

## **2. Оценка содержания диссертационной работы, ее завершенность.**

**Основной целью** диссертационной работы являлось создание теоретической базы для расчета и проектирования композиционных лопаток компрессоров авиационных двигателей, обеспечивающей учет влияния структуры композиционного пакета на НДС конструкции на базе однородных, квазиоднородных и структурно-неоднородных моделей.

Для достижения сформулированных целей диссертационной работы соискателем были поставлены и решены следующие **задачи**:

- разработка метода приближенного решения задачи теории упругости для слоистого неоднородного анизотропного тела, обеспечивающего учет влияния структуры материала на напряженное и деформированное состояние при действии комбинированных нагрузок;

- разработка метода оценки жесткости на кручение неоднородных анизотропных тел, приближенно описываемых моделью закрученного композиционного стержня;
- исследование касательных напряжений на границах слоев упругих анизотропных неоднородных тел;
- разработка методов расчета закрученных анизотропных композиционных стержней с произвольной формой сечения при изгибе, кручении и растяжении центробежными силами;
- разработка методов расчета и оптимизации структуры КМ лопаток компрессоров авиационных двигателей;
- разработка основных соотношений для инженерного расчета напряжений в композиционном пакете, углов раскрутки и частот колебаний лопаток компрессоров.

Постановка и решение описанных задач, анализ результатов сведены в работу следующей **структуры и содержания**.

Во **введении** обоснованы актуальность темы диссертационной работы, выбор метода решения поставленных задач, научная новизна результатов работы, их теоретическая и практическая значимость, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, представлены сведения об апробации работы, публикациях соискателя, структуре и объеме диссертации, а также перечислены результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе** содержится аналитический обзор различных феноменологических моделей поведения КМ и соответствующих систем определяющих соотношений. Приведены основные сведения о композиционных материалах и математических моделях деформирования различных конструкций из КМ. Проведено сравнение моделей на основе эффективных свойств и структурных моделей КМ. Обоснован выбор в качестве базы последующих теоретических разработок структурной модели линейного деформирования стержневых многослойных изделий из КМ. Описаны основные особенности конструкции композиционных лопаток компрессоров авиационных двигателей и

специфика их деформирования, влияющая на выбор силовых схем и армирования материала. Приведены определяющие соотношения линейно-упругого КМ и построенная на их основе модель многослойного стержня произвольного сечения. Описано решение технологической задачи раскрытия слоев композиционного пакета многослойного стержня. Рассмотрена численная реализация задачи о чистом кручении многослойного стержня прямоугольного сечения и аналитически установлена зависимость жесткости на кручение от числа слоев. Предложена номограмма, позволяющая оценить отдельные характеристики многослойного стержня на основе небольшого объема информации о материале слоев на этапе эскизного проектирования тонкостенных многослойных конструкций.

Во **второй главе** рассмотрена задача о кручении для многослойного стержня произвольного сечения и компрессорной лопатки из КМ и ее решение на базе метода конечных элементов. Описан алгоритм разбиения области поперечного сечения стержня треугольными конечными элементами, алгоритм построения матрицы жесткости треугольного элемента слоистого анизотропного стержня и процедура ансамблирования глобальной матрицы жесткости стержня. Приведены результаты конечно-элементного решения задачи о кручении анизотропного композиционного стержня, положенные в основу определения НДС стержневых элементов конструкций, находящихся под совместным действием растягивающих сил (в том числе центробежных нагрузок), изгибающих и крутящих моментов, а также при описании колебаний конструкций такого типа.

В **третьей главе** рассматривается задача о совместном кручении, изгибе и растяжении естественно-закрученных стержневых элементов из КМ. Построены кинематические соотношения теории закрученных стержней, получены уравнения равновесия и постановка краевой задачи при различных вариантах условий сопряжения слоев. Предложен численный алгоритм пошагового решения задачи, описан алгоритм его программной реализации. Построено решение ряда задач о НДС закрученных анизотропных составных стержней с различной формой сечения и структурой композиционного пакета. Получен ряд качественных выводов, в частности, обнаружено существенное перераспределение напряжений

в сечении многослойной конструкции. Приведены результаты сравнения полученных решений с экспериментальными данными, подтверждающие авторские результаты. Приведены решения задач о НДС компрессорных лопаток из КМ в поле центробежных сил.

В четвертой главе при использовании основных результатов третьей главы диссертационной работы предложены упрощенные расчетные схемы для некоторых практических важных случаев деформирования слоистой композиционной компрессорной лопатки. Для определения НДС лопаток, находящихся в поле центробежных сил, проведены численные эксперименты на базе метода конечных элементов и программного комплекса ANSYS. В основу конечно-элементных моделей положены геометрические характеристики сечения компрессорной лопатки слоистой структуры, вычисленные на базе специально разработанного автором программного модуля. Проведен сравнительный анализ конечно-элементных решений задачи о деформировании композиционной лопатки, армированной однонаправленным боралюминием, с авторскими решениями, приведенными в третьей главе диссертационной работе, по компонентам напряжения в сечении. Сделан вывод о вполне удовлетворительном совпадении результатов решения задачи авторским методом, выносимым на защиту, с численным решением задачи для лопатки в трехмерной постановке задачи теории упругости анизотропного квазиоднородного тела.

В пятой главе исследуются поперечные свободные колебания композиционных компрессорных лопаток. Приведена вариационная постановка задачи динамики анизотропного неоднородного упругого стержня слоистой структуры, формулировка основной энергетической теоремы и принципа виртуальных работ для многослойных армированных тел, обобщенная формулировка принципа Гамильтона для динамической задачи теории упругости многослойного анизотропного неоднородного тела. Приведено доказательство единственности решения задачи динамики для упругой многослойной системы. Приведены результаты для первых трех изгибных форм колебаний стержня прямоугольного сечения из КМ и сравнение расчетов с экспериментальными

данными. На базе численных решений показана возможность управлять собственными частотами колебаний без изменения геометрических размеров и формы композитных стержневых элементов путем выбора материала и структуры слоистого композита. Приведены резонансные диаграммы изгибных колебаний для проведения отстройки резонанса от первых четырех гармоник возбуждения на рабочем режиме многослойного стержня прямоугольного сечения.

В **шестой главе** исследуются собственные частоты колебаний естественно-закрученных многослойных анизотропных стержней, находящихся в поле центробежных сил. Приведен краткий обзор основных результатов, полученных в области исследования динамики компрессорных лопаток, включая флаттер. Приведены геометрические соотношения теории слоистых естественно-закрученных стержней с несимметричным поперечным сечением, получены уравнения движения. Рассмотрены консольные равномерно закрученные слоистые анизотропные стержни различной структуры. Получены решения квазистатической задачи о прочности композиционной лопатки на основе пространственно-одномерной модели, изучено влияние центробежных сил на прочность лопатки. Получены решения задач о колебаниях закрученного многослойного стержня несимметричного поперечного сечения, вычислены собственные частоты, путем сравнения с известными решениями обосновывается достоверность полученных автором результатов.

В **заключении** перечислены главные результаты работы и сформулированы основные выводы, следующие из анализа полученных результатов.

### **3. Степень достоверности результатов и выводов.**

*Достоверность* результатов обуславливается использованием корректных формулировок задач теории упругости, обоснованным выбором математических моделей деформирования неоднородных тел, применением апробированных аналитических и вариационных методов решения задач механики твердого деформируемого тела, а также сравнением ряда авторских результатов с экспериментальными данными и численными решениями, построенными на базе апробированных конечно-элементных программных комплексов.

#### **4. Научная новизна основных результатов диссертации.**

Научная новизна работы заключается в:

- новых приближенных моделях деформирования неоднородных призматических тел с учетом слоистой структуры, явно учитывающих влияние числа слоев, свойств отдельных слоев, их взаимодействие, а также деформацию поперечного сечения;
- новых аналитических решениях задач о НДС призматических тел с удовлетворением всех граничных условий на поверхностях раздела слоев на базе предложенных приближенных моделей;
- новом численно-аналитическом методе определения жесткости на кручение слоистых анизотропных стержней произвольного сечения и построенных аналитических выражениях зависимости жесткости на кручение от количества и структуры слоев;
- новых кинематических соотношениях теории естественно-закрученных слоистых анизотропных стержней, учитывающих нелинейные эффекты, эффекты поперечных сил и НДС в плоскости сечения;
- оценках распределения и уровня напряжений в отдельных слоях структуры многослойного анизотропного стержня, обеспечивающих проведение оптимизации структуры КМ стержня по напряженному состоянию при сохранении геометрических характеристик;
- новом методе аналитического решения задачи о НДС многослойного анизотропного призматического стержня произвольного сечения при действии растягивающих, в том числе центробежных, сил, изгибающих и крутящих моментов;
- новых оценках зависимости собственных частот колебаний лопаток компрессоров из КМ на базе приближенных моделей.

#### **5. Научная и практическая значимость результатов диссертации.**

*Научная значимость* результатов работы состоит в разработке класса приближенных математических моделей, обеспечивающих построение аналитических решений задач о комбинированном изгибе, растяжении и кручении

композиционных стержней с произвольной формой поперечного сечения при наличии существенной закрутки, а также в создании теоретических основ для аналитического исследования аэроупругих колебаний композиционных лопаток компрессоров авиационных двигателей.

*Практическая ценность* результатов диссертационной работы заключается в алгоритмах эскизных расчетов перспективных элементов конструкций авиационных двигателей, выполненных из композиционных материалов, в первую очередь лопаток компрессоров. Следует отметить, что результаты работы были использованы при изготовлении пресс-формы композиционной лопатки ветроэнергетической установки, что подтверждено актом о внедрении.

#### **6. Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

Разработанный автором программный модуль, основанный на результатах диссертационной работы, представляется возможным использовать для определения НДС в многослойных анизотропных стержнях произвольного сечения при кручении.

#### **7. Оценка стиля диссертации и автореферата.**

Стиль изложения теоретического материала, использование математического аппарата и специальной терминологии соответствуют требованиям к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформированного твердого тела».

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Выносимые на защиту результаты диссертации опубликованы в 38 (тридцати восьми) печатных работах, в том числе в 18 (девятнадцати) статьях в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, из которых восемь статей опубликованы диссертантом без соавторов, и одной монографии. Также по материалам диссертационной работы зарегистрированы:

- один патент на изобретение,
- одно авторское свидетельство на программы для электронных вычислительных машин.



## 8. Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. Обзорная часть диссертационной работы, являющаяся ключевой для формулировки актуальной темы диссертационного исследования и обоснования новизны полученных автором и выносимых на защиту результатов, частично перенесена во введение, частично – в первую главу, посвященную постановке задачи, частично – во вторую, третью, четвертую, пятую и особенно в шестую главы, где подробно анализируется состояние теории флаттера лопаток, несмотря на то, что «... вопросы прогнозирования возможности возникновения флаттера выходят за рамки данной работы», как указано автором на с. 296. Обзор излагается весьма фрагментарно в нескольких параграфах, что затрудняет чтение работы и не полностью соответствует стандартам оформления диссертаций.
2. Включение в обзор и постановочную часть диссертации сведений о физических свойствах структурных составляющих КМ, сведенных в таблицы, не представляется необходимым и нарушает структуру работы. По крайней мере, часть известных соотношений, приведенных в п. 1.3, целесообразно было перенести в Приложение к диссертации.
3. Постановки задач, в первую очередь основные гипотезы, автором не всегда приводятся с достаточным для диссертационных работ на соискание ученых степеней по специальности «Механика деформируемого твердого тела» уровнем математической строгости, что затрудняет чтение работы и правильное понимание последующих выкладок.
4. В главе 4 автором рассмотрен пример широкохордной лопатки (рис. 4.1.1), модель которой достаточно сложна и ближе к пологой оболочке переменной толщины и кривизны, чем к стержню, что отмечается автором на с. 166. Описание таких конструкций пространственно-одномерной моделью, где это представляется возможным, весьма актуально, но требует аккуратного обоснования путем сравнения, как минимум, с результатами вычислительного эксперимента, особенно в задачах динамики. Автором

получено решение в трехмерной постановке на базе конечно-элементного комплекса ANSYS на основе квазиоднородной модели и сделан вывод о совпадении результатов с авторскими, полученными на основе структурной модели; однако, данный вывод обосновывается сравнением только графических данных главы 3 и главы 4, различным образом оформленных и представленных в разных единицах измерения.

5. Сравнение напряжений, полученных на базе *трехмерной квазиоднородной* модели с напряжениями, полученными на базе *пространственно-одномерной структурной* модели не представляется вполне корректным (первая более точна в силу большей пространственной размерности, но пренебрегает структурой КМ, вторая точнее учитывает структуру, но содержит погрешности за счет пространственной редукции задачи теории упругости). В то же время поля вектора перемещения на поверхности лопатки автором не сравниваются.
6. Следует заметить, что автором не приведены какие-либо сведения о сходимости конечно-элементного решения в зависимости от числа узлов и типа элементов. Судя по рис. 4.4.2, конечно-элементная сетка достаточно груба, что может привести к существенному искажению поля напряжений при его интерполяции даже в структурно-однородной модели, тем не менее автором на основе полученного численного решения делаются количественные и качественные выводы о величине компонентов напряжения в сечении лопатки.
7. Текст диссертационной работы содержит опечатки, в некоторых случаях искажающие смысл (например, заголовок п. 1.3).

Указанные замечания не приводят к критическому снижению качества работы и не препятствуют ее положительной оценке. С учетом перечисленного выше следует заключить, что *диссертационная работа представляет собой законченное исследование, выполненное на достаточно высоком научном и методическом уровне.*

**Заключение о соответствии диссертационной работы критериям,  
установленным Положением о присуждении ученых степеней.**

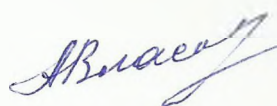
*Представленная к защите диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой получено решение важной, актуальной как теоретически, так и в прикладном отношении задачи.*

Структура диссертации, язык изложения материала и терминология соответствуют современному уровню и существующим требованиям к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени доктора наук. Результаты диссертационной работы получены соискателем самостоятельно, являются новыми, обладают как теоретической, так и практической значимостью, опубликованы в достаточном количестве в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, обсуждены на международных и российских научных конференциях и семинарах с участием ведущих специалистов в области исследования.

Область исследования и основные результаты диссертационной работы полностью соответствуют паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

*В целом, работу следует оценить положительно.* Диссертация отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Нурымбетов Алибек Усипбаевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Ведущий научный сотрудник  
ИПРИМ РАН,  
доктор технических наук



ВЛАСОВ  
Александр Николаевич

Настоящий отзыв рассмотрен и утвержден Ученым Советом ИПРИМ РАН  
протокол № 2/17 от 07 февраля 2017 г.

Ученый секретарь ИПРИМ РАН  
кандидат физ.-мат. наук



Карнез Ю. Н.