

ОТЗЫВ

официального оппонента АНОШКИНА Александра Николаевича на диссертационную работу НУРИМБЕТОВА Алибека Усипбаевича, «Стержневые и полупространственные модели деформирования слоистых закрученных изделий в поле стационарных и нестационарных нагрузок», представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела».

Теория многослойных анизотропных конструкций (теория стержней) является одним из больших разделов механики деформируемого твердого тела, имеющим важное прикладное значение. Не случайно, что первые работы Б. Сен-Венана, посвященные исследованию деформирования упругих тел, появилось до возникновения математической теории упругости. На основе классической теории стержней, созданных позже, решены и решаются важные технические задачи расчета напряженно-деформируемого состояния (НДС) многослойных анизотропных конструкций. Однако в рамках классической теории не все краевые задачи многослойных анизотропных стержней допускают корректную математическую формулировку. Прежде всего, это относится к задачам расчета НДС слоистых композитных конструкций. Сложности, возникающие при решении таких задач, обусловлены тем, что порядок дифференциальных уравнений классических теорий стержней, построенных на основе кинематических и силовых гипотез, зависит от типа граничных условий, заданных на лицевых поверхностях стержня, а именно, от того, заданы ли эти условия в перемещениях или напряжениях. Поэтому создание теории многослойных анизотропных стержней свободной от подобного рода недостатков является **актуальной** задачей механики деформируемого тела. В связи с развитием использования композитных материалов особую **актуальность** получили математические модели материалов со структурой. Проблема моделирования структурой стержневых изделий, разработка методов расчета НДС многослойных конструкций и получение конкретных результатов, отражающих особенности деформирования многослойных тел, делает тему диссертационной работы **важной и в теоретическом и в прикладном** плане. Решению этой проблемы и посвящена диссертационная работа Нуриμβетова А.У.

Целью диссертации является разработка математических расчетных моделей многослойных стержней, позволяющих исследовать НДС композиционных тел стержневого типа на основе линейного анизотропного и структурного подходов, совершенствование уже предложенных и построение новых методов и алгоритмов, позволяющих находить точные решения в многослойных анизотропных тел.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Во **введении** приведен краткий обзор по главам, обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведен обзор современного состояния исследований по теме диссертации. Обосновано необходимость диссертационного исследования. Рассмотрена общая постановка задач обобщенного кручения многослойных анизотропных стержней. В диссертации однонаправленный слой рассматривается как квазиоднородная анизотропная среда, упругие свойства которой определяются упругими свойствами ее составляющих материалов, т.е. свойствами волокон и матрицы, их количественным соотношением, а также расположением волокон и их ориентацией. Деформация **обобщенного** - кручения

10-02-17

характеризуются не только искривлением сечения и поворотом его вокруг оси, параллельной геометрической, но также и изменением формы в плане сечения и искривлением самой оси. В этом случае все шесть составляющих компонент напряжения не равны нулю. Поэтому, в приближенной теории закрученных стержней многослойного произвольного сечения, основанной на определенных гипотезах, разделяют компоненты напряжений и деформаций на главные и второстепенные, которыми в ряде уравнений можно пренебречь. В диссертации, в отличие от классической теории тонких изогнуто-закрученных стержней Кирхгофа-Клебша, решение сводится к системе дифференциальных уравнений с параметрами, учитывающих особенности на границах раздела слоев. В связи с тем, что физико-механические свойства слоев могут отличаться друг от друга, в работе предложен алгоритм вычисления приведенных механических характеристик поперечного сечения, реализованный в виде программы на языке Фортран. Взятые из разных сечений координаты начала и конца одного слоя образуют координаты одного лепестка, т.е. в первой главе решена и технологическая задача раскроя слоев ленты, ткани по длине стержня, что подтверждена **актом внедрения**.

Для решения задачи обобщенного кручения слоистого стержня методом последовательных приближений найдено решение задачи о чистом кручении для каждого слоя. Полученная форма разрешающих соотношений выгодно отличается от соотношений, предложенных другими авторами, тем, что позволяет непосредственно получить решение задачи в перемещениях. Для доказательства достоверности результатов решения задачи о кручении анизотропных слоистых стержней, полученных приближенным методом, было проведено сравнение с точными решениями для многослойных сечений с изотропными и ортотропными слоями и с экспериментальными результатами других авторов. На основе полученного решения разработан алгоритм и составлена программа для ЭВМ. С помощью разработанной программы проведены исследования касательных напряжений, перемещений в отдельных анизотропных слоях и определены жесткости на кручение многослойных стержней прямоугольного, ромбовидного сечения, составленных из изотропных и ортотропных материалов. Численное исследование задачи о кручении составных стержней прямоугольного сечения показывает существенное изменение напряжений и перемещений при переходе от слоя к слою. Разработана методика количественной оценки жесткости на кручение тела слоистой структуры для получения точных результатов аналитических решений задачи о кручении многослойного стержня прямоугольного сечения.

Во второй главе рассматривается общая постановка задачи о кручении составных анизотропных стержней произвольного поперечного сечения методом конечных элементов (МКЭ). Показано, что при переходе от слоя к слою скачком могут изменяться отдельные компоненты тензора напряжений, а из-за непрерывности других касательных напряжений и осевых перемещений в слоях с относительно низкой прочностью на сдвиг уже при малых углах закручивания могут возникать высокие напряжения. В главе предлагается методика и алгоритм решения задачи о кручении слоистых анизотропных стержней МКЭ, алгоритм реализован в виде пакета программ на языке FORTRAN, что подтверждено **авторским свидетельством** интеллектуальной собственности РФ. Рассмотрена задача о кручении стержней прямоугольного, ромбовидного сечений и сечения компрессорной лопатки. Приведены результаты численного решения этой задачи, проведено сравнение осевых перемещений для сечений стержней, полученные МКЭ, с аналогичными значениями, полученными аналитическим методом. Численные результаты

полученных значений жесткости стержней на кручение используется в дальнейшем в главах три и шесть диссертационной работы при определении НДС естественно-закрученных слоистых стержней. Основные результаты второй главы ранее не встречались в литературе и поэтому их **новизна** не вызывает сомнения.

Третья глава посвящена исследованию поведения естественно-закрученных многослойных стержней в поле центробежных сил при совместном действии кручения, изгиба и растяжения. Предложены новые кинематические соотношения, более полно отражающие влияния начальной закрученности и деформации кручения стержня. Сформулирована общая постановка задачи расчета НДС закрученного многослойного стержня при действии растягивающей силы, изгибающих и крутящего момента, учитывающая нелинейные деформации, эффекты поперечных сил, деформации в плоскости сечения и температуру. Получена система разрешающих уравнения для поставленной задачи относительно параметров деформации, изгиба и кручения. Отличительной особенностью разрешающих уравнений для многослойного стержня является взаимное влияние деформаций растяжения, изгиба и кручения. Показано, что полученные разрешающие уравнения сводятся к известным соотношениям для некоторых частных случаев механики стержней. Кроме того, в главе приведено сравнение результатов решения задачи с помощью полученных соотношений с экспериментальными данными. Это служит подтверждением достоверности предложенных автором уравнений теории закрученных многослойных стержней. Приведен анализ полученных уравнений, показывающий, что при использовании КМ в закрученных стержнях появляется ряд дополнительных эффектов и возможностей управления НДС в слоях, связанных с изменением схемы армирования и материала слоев.

Используя разработанную теорию закрученных многослойных стержней, в данной главе составлена программа расчета на ЭВМ, которая позволяет численно определить НДС стержней и лопаток из композиционного материала. По разработанной программе проведен расчет НДС слоистой компрессорной лопатки из КМ в поле центробежных сил. По результатам расчета построено семейство кривых, отражающих зависимости деформаций растяжения, растягивающего усилия, осредненного напряжения, раскрутки и жесткости на кручение для восьми исследованных поперечных сечений лопатки.

На основе анализа результатов расчетов автором выявлен ряд эффектов, позволяющих управлять напряжениями в слоях композитной лопатки. Показано, что при заданной геометрической форме лопатки, выбираемой из аэродинамических соображений, изменяя её перекрестную схему армирования лопатки можно уменьшить продольные напряжения и снизить уровень сжимающих напряжений на кромках профиля. Это обеспечит более равномерное распределение продольных напряжений по сечению лопатки. Показано, что угол раскрутки периферийного сечения лопатки можно уменьшить, увеличивая его жесткость на кручение, изменяя схему перекрестного армирования слоев, либо используя в пакете слоев материал с более высокой жесткостью на растяжение. Показано, что при возрастании жесткости слоев неравномерность нормальных напряжений в поперечном сечении и величина касательных напряжений между слоями увеличиваются. Сформулирована рекомендация при проектировании композитных лопаток обеспечения плавное изменение жесткости слоев в её схеме армирования.

Четвертая глава является частными- случаями третьей главы. Приведены результаты численного решения определения НДС в композиционной лопатке с помощью

пакета ANSYS и проведено сравнение с результатами расчета, полученными в третьей главе по программе, разработанной автором диссертационного исследования. Рассмотрена компрессорная лопатка, изготовленная из однонаправленного боралюминия. Рассчитано НДС для восьми сечений лопатки. По результатам расчетов построены изолинии распределения перемещений и напряжений по длине лопатки для спинки (выпуклая сторона сечения) и корытца (вогнутая сторона сечения). Результаты численного решения, полученного с помощью пакета ANSYS, совпадают с результатами, полученными в третьей главе, что подтверждает достоверность соотношений, полученных в главе три.

В пятой главе разработаны методы решения задачи определения НДС в армированном слоистом теле в условиях динамического деформирования. На основе линейной модели деформирования слоистых сред с помощью вариационных принципов получены расчетные соотношения для исследования динамических явлений в армированных слоистых телах. Методом Ритца решена задача о поперечных свободных колебаниях многослойного стержня произвольного сечения, изготовленного из КМ. Полученная формула позволяет подсчитать низшие собственные частоты армированного стержня с постоянным по длине сечением произвольной формы, но с возможностью неравномерного распределения физических параметров композиционного материала по сечению. Показано, что в случае изотропного стержня полученные выражения сводятся к формуле Рэлея-Ритца. Вычисленные на основе полученных соотношений значения собственных низших частот (первых трех) и форм колебания стержня прямоугольного поперечного сечения из стеклопластика удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Из приведенных данных следует, что отличия расчетных и экспериментальных значений собственных частот незначительны и, в целом, находятся в пределах разброса экспериментальных данных. В качестве примера использования полученных соотношений приводятся резонансные диаграммы изгибных колебаний для многослойного стержня прямоугольного сечения и предложена методика отстройки от возможных резонансных частот стержневых слоистых изделий из КМ с помощью изменения схемы армирования и свойств отдельных слоев.

В шестой главе, на основе разработанного варианта теории закрученных слоистых анизотропных стержней, рассмотренного ранее в главах 3 и 5, определяются собственные частоты закрученных анизотропных стержней, находящихся в поле центробежных сил. Далее из уравнения равновесия для несимметричной вещественной матрицы, находятся продольные, крутильные и изгибные собственные частоты слоистого стержня. После вычисления собственных векторов, соответствующих отдельному собственному числу, определяются формы колебания слоистого стержня. Таким образом, полученная в шестой главе система уравнения позволяет определить собственные частоты закрученных анизотропных стержней, находящихся в поле центробежных сил. Совпадение формулы собственных частот, в частных случаях, с известными результатами других авторов доказывает достоверность полученных результатов. Собственные частоты, рассчитанные по полученным формулам, а также с использованием пакета ANSYS отличаются в среднем на 5%. Показано, что изменяя материал и схему армирования слоев можно в широких пределах управлять собственными частотами колебаний вращающихся композитных стержней при одних и тех же физических оборотах ротора.

Достоверность полученных результатов обоснована строгостью математических формулировок рассматриваемых задач, а также применением аналитических, вариационных и численных методов решения задач механики деформируемого твердого

тела. В обоснование достоверности полученных результатов проведены их сравнения с известными теоретическими и экспериментальными данными. Результаты расчетов геометрических и физико-геометрических характеристик в тестовых примерах для стержней простой формы сечения полностью согласуются с результатами аналитических расчетов.

Научная новизна.

1. Получена система разрешающих соотношения для задачи о кручении слоистого стержня произвольной формы поперечного сечения с явным учетом взаимодействия анизотропных слоев и депланации поперечного сечения; предложено приближенное решение этой задачи с помощью разложения по степеням малого параметра.

2. Разработана методика решения задачи о кручении призматического стержня прямоугольного сечения из различных ортотропных слоев с удовлетворением условий на контактных поверхностях слоев и учетом основных закономерностей распределения касательных напряжений и перемещений.

3. Выявлены закономерности изменения жесткости сечения на кручение слоистого стержня с увеличением числа слоев, найдено соответствующее аналитическое выражение, построены номограммы и таблицы для определения жесткости на кручение стержней из композиционных материалов по параметрам слоев, разработана методика определения жесткости на кручения слоистых стержней произвольного сечения на основе решения задачи методом конечных элементов.

4. Разработан и реализован в виде программы алгоритм раскрытия слоев композитного стержня, формирующих заданные профили поперечного сечения по его длине.

5. Сформулирована математическая постановка и предложен алгоритм приближенного решения задачи теории упругости для многослойного анизотропного стержня произвольного сечения при действии растягивающих сил, изгибающих и крутящих моментов.

6. Предложены новые нелинейные кинематические соотношения для естественно-закрученных слоистых анизотропных стержней, учитывающие эффекты действия поперечных сил и НДС в плоскости сечения.

7. Получены основные соотношения для расчета НДС в естественно-закрученных композитных телах стержневого типа в поле центробежных сил; на основе расчетов по данным соотношениям выявлены особенности распределения напряжений в слоях композитных лопаток при эксплуатационных нагрузках, показаны возможности изменения углов раскрутки и напряжений в слоях, за счет изменения схемы армирования и жесткости слоев.

8. Решена задача о поперечных свободных колебаниях многослойного стержня произвольного профиля; получены расчетные соотношения для определения собственных частот стержня постоянного сечения с неравномерным распределением физических параметров; получены резонансные диаграммы изгибных колебаний многослойных стержней прямоугольного сечения и предложена методика отстройки от возможных резонансных частот стержневых изделий с помощью изменения схемы армирования и свойств слоев.

9. Решена задача о крутильно-продольных и изгибных колебаниях вращающегося закрученного многослойного анизотропного стержня; получены

расчетные соотношения для определения собственных частот и форм колебаний стержня прямоугольного сечения, находящегося в поле центробежных сил.

Теоретическая значимость полученных автором результатов заключается в разработке нового подхода к решению комплекса задач определения НДС многослойных анизотропных стержневых изделий из композиционных материалов, находящихся в поле растягивающих сил, изгибающих и крутящего моментов

Практическая значимость полученных автором результатов определяется возможностью использования разработанных автором алгоритмов для расчета и проектирования многослойных композитных лопаток турбомашин. Автором разработаны программы, позволяющие проводить послойный раскрой сечений по длине лопатки и определять НДС слоистых анизотропных стержней при кручении. По результатам исследований получен патент и удостоверение автора на «Способ изготовления композитных лопаток ветроустановок согласно утвержденным математическим моделям методом вакуумно-компрессорной пропитки». В диссертации имеется акт внедрения результатов диссертационной работы в виде методики расчета НДС лопатки из композиционных материалов для роторов ветроэнергетических установок на предприятии ООО «Политермо» (г. Истра, Московской области).

Таким образом, разработанные методы решения рассмотренных задач и полученные результаты в диссертации в целом являются **новыми** и представляют несомненную **научную и практическую** ценность.

Замечания по диссертационной работе:

1. В первой главе диссертации не проведен сравнительный обзор композиционных материалов по типу армирующего наполнителя слоев: однонаправленный ровинг или двунаправленная ткань. При этом наблюдается некоторая эклектика в описании свойств композиционных материалов, используемых в качестве ламинатов (отдельных слоев) при создании слоистого композита. Расчетные формулы для прогнозирования упругих свойств, например, приведены только для однонаправленных волокнистых композиционных материалов. Пределы прочности, наоборот, приведены только для текстильных стеклопластиков. Не приведены, хотя бы ориентировочно, упругие свойства и пределы прочности текстильных углепластиков, широко используемых в настоящее время в России для создания деталей и узлов авиационных двигателей и планера самолета. В настоящее время при проектировании лопаток из КМ является открытым вопрос: какой тип армирующих наполнителей - на основе однонаправленных ровингов или двунаправленных тканей - предпочтительнее для создания конструкций лопаток или лопастей? Было бы интересно в последующих главах диссертации сравнить особенности НДС и оценки прочности слоистых конструкций, выполненных из однонаправленных и тканевых композитов.

2. Недостаточно обоснована используемая модель слоистого композиционного материала с «межслоевыми эпоксидными прослойками» для решения задачи кручения углепластикового стержня в главах 1, 3 диссертации. Не ясно, как на основе заданных параметров армирующих слоев и объемных долей наполнителя и матрицы композиционного материала определяются размеры межслоевых эпоксидных прослоек. Очевидно, что эти прослойки должны быть частью матрицы, большая часть матрицы при этом должна находиться внутри армирующего слоя. Выделение части матрицы в качестве прослойки приведет к повышению объемной доли наполнителя в армирующем слое и изменению его упругих свойств. Почему для оценки межслоевых напряжений

рассматриваемого углепластикового стержня нельзя использовать обычную модель слоистого композита, в чем преимущество используемой модели с эпоксидными прослойками? Почему при решении задачи МКЭ в главе 3 и 4 эпоксидные прослойки не рассматриваются?

3. Недостаточно точно указано преимущество разработанных автором программ МКЭ для расчета многослойных анизотропных стержней по сравнению с имеющимися стандартными пакетами. Указанные в разделе 2.3 ограничения на количество узловых точек исследуемой области ($n < 1000$) устарели - приведены ссылки на работы по МКЭ 80-ых годов. В настоящее время на российских и зарубежных предприятиях для выбора схемы армирования и раскроя слоев проектируемых композитных конструкций широко используется программный пакет FiberSim, совместно с пакетами UG NX и ANSYS. В последнем проводится дискретизация по слоям композитной конструкции и численное решение задачи механики, количество узловых точек при этом для обычных ЭВМ составляет десятки и сотни тысяч. Было бы интересно проиллюстрировать каким-либо примером возникновение конфликтных ситуаций, упомянутых в диссертации, при решении рассматриваемых задач о кручении, растяжении и изгибе композитных стержней в пакете ANSYS и отсутствие таких конфликтов при использовании разработанного программного комплекса.

4. При построении разрешающих соотношений МКЭ в задаче о кручении многослойных анизотропных стержней (глава 2) рассматриваются только межслоевые напряжения и деформации. Не учитываются другие деформации и напряжения, которые могут возникнуть в анизотропном стержне от действия крутящего момента, как показано в разделе 1.5.4 диссертации.

5. В главе 3 было бы полезно провести анализ напряжений в слоях рассматриваемых композитных конструкций в главных осях симметрии слоя и сравнить их с соответствующими предельными значениями для слоя. Это позволило бы получить приближенную оценку прочности для слоя, для пакета в целом и показать возможности повышения прочности конструкции при изменении схемы армирования. Анализ напряжений в слоях в расчетной системе координат не позволяет выявить этот эффект, поскольку сравнение необходимо проводить с неизвестными предельными значениями напряжений для материалов слоев в расчетной системе координат.

6. В главе 4 неясно, какая постановка соответствует результатам численного решения задачи расчета НДС лопатки средствами ANSYS, приведенного в разделе 4.4. Не указаны важные особенности используемой компьютерной модели лопатки: какие элементы используются для численного решения, их количество, проверка сходимости численного решения, способ моделирования анизотропной слоистой структуры лопатки. Судя по схеме дискретизации рис. 4.4.1 и приведенным полям перемещений, деформаций и напряжений (рис. 4.4.2-4.4.6), в разделе 4.4 решается пространственная задача теории упругости, однако в тексте главы описывается постановка задачи для стержневой модели. Судя по рис. 4.4.2 при дискретизации в явном виде не описывается слоистая структура лопатки, однако в тексте не указано каким образом задаются упругие свойства материала.

7. В 5 главе диссертации было бы интересно дополнить сравнение расчетных и экспериментальных собственных частот стеклопластикового стержня, сравнением с собственными частотами, определенными численно в пакете ANSYS. Это позволило бы получить оценку точности вычисления собственных частот высоких порядков (> 3).

Сделанные замечания не ставят под сомнение значимость представленных в диссертации результатов, квалификацию исполнителя и общую положительную оценку диссертационной работы Нуриμβетова А.У.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основные результаты, выносимые на защиту, опубликованы в 38 работах, среди которых 18 статей в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, и апробированы на международных, всероссийских конференциях и семинарах. Диссертационная работа достаточно хорошо оформлена и иллюстрирована, проведен полный литературный обзор по теме исследования, имеется шесть приложений, содержащих: разработанный автором алгоритм проектирования раскроя деталей из композиционных материалов, вывод математических соотношений, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, удостоверение автора изобретения, акт внедрения результатов диссертационной работы. Текст работы написан правильным научным языком.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней».

Суммируя вышесказанное можно утверждать, что диссертационная работа НУРИМБЕТОВА Алибека Усипбаевича на соискание ученой степени доктора технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена крупная научная проблема, имеющая важное теоретическое и практическое значение в области моделирования многослойных анизотропных стержневых изделий произвольного сечения.

Диссертационная работа Нуриμβетова А.У. «Стержневые и полупространственные модели деформирования слоистых закрученных изделий в поле стационарных и нестационарных нагрузок» соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении научных степеней», утвержденного Правительством РФ №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор Нуриμβетов Алибек Усипбаевич заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.04 -«Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Адрес: 6149900, РФ, Пермский край, г. Пермь - ГСП, Комсомольский пр. 29

E-mail: rector@pstu.ru, телефон +7(342)2123927.

А.Н. Аношкин

Докторская диссертация защищена по специальности
01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела
Адрес места основной работы:

614990, РФ, Пермский край, г. Пермь - ГСП, Комсомольский пр. 29.

Рабочий телефон: +7(342)2391294, адрес электронной почты: anoshkin@pstu.ru

Подпись А.Н. Аношкина заверяю



В.И. Макаревич