

"УТВЕРЖДАЮ"

Ректор ФГБОУ ВО  
«Новосибирский

государственный технический  
университет»

профессор Батаев А.А.

04 декабря 2017 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации «Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» на диссертацию Федоровой Натальи Александровны «Математическое моделирование плоских конструкций из армированных волокнистых материалов», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Представленная на отзыв диссертация изложена на 238 страницах и состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 151 наименования, содержит 135 рисунков и 10 таблиц.

*Актуальность работы определяется использованием тонкостенных элементов конструкций из волокнистых композитных материалов в различных областях современной техники (в авиации, космонавтике, судо- и машиностроении, в объектах атомной и химической промышленности). Возможности существенного прироста прочностных характеристик сталей, алюминиевых, титановых и магниевых сплавов практически исчерпаны и поэтому для существенного улучшения технических параметров в объектах ответственного назначения необходимо использовать разнообразный спектр современных композитных материалов, сочетающих высокую удельную прочность и жесткость с другими ценными качествами: высокой технологичностью изготовления конструкций из них, повышенной стойкостью к агрессивным средам. Вместе с тем внедрение композитов в*

силовые элементы несущих конструкций ответственного назначения требует тщательного изучения новых математических моделей их деформирования и разрушения, учитывающих анизотропию и неоднородность их структур, большие градиенты полей напряжений и температур, возникающих в зонах межфазного взаимодействия.

Работа Федоровой Н.А. посвящена созданию теоретических подходов и практических методов исследования процесса управления структурой волокнистого композита в произвольной криволинейной системе координат в рамках плоской неоднородной анизотропной теории упругости.

*Краткий обзор содержания работы.* Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее основная цель и конкретные задачи исследования, представлены краткий исторический обзор и положения, вносимые на защиту.

**В первой главе** сформулирована в криволинейной ортогональной системе координат плоская задача армированных сред. Для определения предельных деформаций плоских конструкций с криволинейными траекториями армирования получены разрешающие уравнения для линейной анизотропной неоднородной задачи упругости, включая уравнение совместности деформаций, в случаях биполярной, эллиптической, параболической, гиперболической, кардиоидальной систем координат. Переход от декартовых координат к криволинейной ортогональной системе координат осуществляется с помощью аналитических функций комплексного переменного. Многообразие структур армирования на базе ортогональной системы координат достигается путем построения изогональных траекторий к данным координатным линиям. Детерминатным методом исследован тип полученной системы дифференциальных уравнений в частных производных относительно компонент тензора деформаций. Установлено, что система имеет эллиптический тип для армирования вдоль двух семейств траекторий, являющихся координатными линиями ортогональной системы координат. Поставлена краевая задача в деформациях в криволинейной системе координат.

**Во второй главе** построены разрешающие системы уравнений плоской задачи для одного семейства равнонапряженных и нерастяжимых, прямолинейных и криволинейных волокон в прямоугольной декартовой системе координат. Установлено, что они составного типа для семейства

нерастяжимых волокон. Введение условия равнонапряженности семейства волокон приводит к вырождению типа системы. Получены численно-аналитические решения частных задач.

**В третьей главе** проанализированы свойства общей системы разрешающих уравнений плоской задачи упругости в декартовой системе координат для среды, армированной двумя семействами волокон в направлениях ортогональных и изогональных траекторий. Получены некоторые частные аналитические решения (армирование по семействам эллипсов и гипербол в декартовой системе). Исследованы краевые задачи для семейств равнонапряженных и нерастяжимых волокон с различными упругими свойствами и получены зависимости решений от выбора интенсивностей армирования, формы контура, внешней нагрузки, условий равнонапряженности. Получены аналитические решения для интенсивностей армирования вдоль траекторий, изогональных к выбранным семействам кривых. Установлено, что введение изогонального армирования с параметром  $k$  ( $k$  – тангенс угла, под которым изогональная траектория пересекает кривую данного семейства) порождает разные типы разрешающей системы дифференциальных уравнений (гиперболический, эллиптический, смешанный тип). Следовательно, приводит к различным постановкам краевых задач. Изогональное армирование позволяет существенно расширить многообразие структур армирования, что дает возможность управлять напряженно-деформированным состоянием конструкции.

**В четвертой главе** в рамках плоской задачи на основе структурной модели в декартовой системе координат построены разрешающие системы уравнений для возможных комбинаций армирования тремя нерастяжимыми и равнонапряженными семействами волокон. С помощью алгоритма построения инвариантных решений уравнений в частных производных найдены некоторые точные решения этой модели. На основе полученных решений найдено уравнение граничного контура при условии равнодеформируемости семейств волокон. Рассмотрена комбинация семейств волокон, когда два семейства армирующих волокон задаются известными функциями декартовых координат, а третье семейство расположено в направлении угла армирования, представляющем собой неизвестную функцию.

**Пятая глава посвящена** постановке плоской задачи армированных сред в полярной системе координат. Найдены разнообразные структуры

армирования по изогональным траекториям. Рассмотрено армирование вдоль траекторий, изогональных радиальным направлениям. Решена обратная задача для армированной кольцевой пластины.

**В шестой главе** на основе структурной модели в рамках линейной неоднородной осесимметричной задачи упругости получена разрешающая система уравнений, описывающая поведение армированной кольцевой пластины. Система обыкновенных дифференциальных уравнений сформулирована относительно радиального и окружного перемещений в полярной системе координат. Армирование выполняется вдоль спиралевидных траекторий в рамках рационального проектирования задачи об армированной среде. В качестве критерия рациональности введено условие постоянства сечений волокон. Интенсивность армирования определяется посредством интегрирования уравнения постоянства сечений волокон вдоль выбранной конкретной траектории. Рассмотрено армирование двумя семействами волокон: траектории армирования -- семейства алгебраических спиралей и комбинации спиралей с семейством прямых, известных в технике как "спицы велоколеса". Многообразие траекторий армирования расширяется путем построения криволинейных траекторий, изогональных к рассматриваемым семействам кривых. Система и граничные условия представляют собой двухточечную краевую задачу неканонического вида для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Коэффициенты системы содержат полный набор структурных характеристик: число семейств армирующих волокон, механические характеристики материалов связующего и волокна, интенсивность и тригонометрические функции углов армирования. Построен эффективный численный метод посредством приведения системы к канонической форме и реализации адаптивной схемы ортогональной прогонки. Постановка исходной задачи свелась к реализации единой схемы, которая учитывает разнообразные механические формулировки задачи.

**В седьмой главе** на основе методики армирования по криволинейным траекториям в рамках осесимметрической постановки решена задача о нахождении предельных деформаций вращающихся дисков газовых и гидротурбин. Рассмотрено растяжение трехслойного диска под действием центробежной силы в полярной системе координат. Толщина диска предполагается малой по сравнению с наружным радиусом диска. На диск действуют центробежные силы от вращения, они направлены радиально и

равномерно распределены в окружном направлении. Диск неравномерно нагрет по радиусу. Температура постоянна по толщине. Для построения замкнутой системы разрешающих уравнений задача сформулирована относительно радиальных и окружных перемещений. В результате получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, не разрешенная относительно производных от перемещений, моделирующая растяжение трехслойного диска под действием центробежной силы. В рамках численного эксперимента исследованы предельные скорости вращения дисков газовых турбин на примере титанового диска массой 9,8 кг, ограниченного контурами с радиусами  $r_1 = 0,05$  м.,  $r_2 = 0,1$  м. с защитными керамическими покрытиями толщиной 0,03 мм. Рассмотрены три типа структур армирования двумя семействами керамических волокон. Первая структура – траекториями армирования являются семейства спиралей Архимеда и логарифмических спиралей; вторая структура – семейство спиралей Архимеда и "спицы велоколеса", третья структура – семейство логарифмических спиралей и "спицы велоколеса". Показано, что может быть достигнуто существенное увеличение предельной скорости вращения армированного диска газовой турбины за счет выбора структуры армирования двумя семействами криволинейных волокон. Построена модель для расчета армированного диска гидротурбины. Приведены примеры армирования по спиралевидным траекториям. В рассмотренных примерах материалом связующего является титан, армирование проводится двумя семействами стальных волокон. Установлено существенное влияние структур армирования и геометрических параметров армирования на предельные скорости вращения диска.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

*Теоретическая* значимость работы состоит в решении новых краевых задач неоднородной анизотропной теории упругости, открывающих широкие возможности управления полями напряжений и деформаций в плоских тонкостенных конструкциях за счет целевого выбора криволинейных структур армирования.

*Практическая* значимость и рекомендации по использованию **результатов и выводов, приведенных в диссертации.**

Полученные автором выводы и результаты могут быть взяты за основу при разработке численных экспериментов, касающихся деформирований пластин

из армированного волокнами упругого материала, они предлагают новые пути усовершенствования технологии инженерного творчества, которые позволяют сначала создать изделия, а потом производить на нём эксперименты.

*Научная новизна работы* обусловлена решением новых краевых задач неоднородной анизотропной теории упругости, которое открывает широкие возможности управления полями напряжений и деформаций в плоских тонкостенных конструкциях за счет целевого выбора криволинейных структур армирования.

*Достоверность и обоснованность основных результатов работы.* Обоснованность научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, гарантируется корректностью постановок рассматриваемых задач и методов их решения, предельным переходом от модели армированной среды к известным моделям однородной линейной теории упругости, сравнением для частных случаев аналитических решений, сравнением с численными экспериментами известных специалистов.

*Общая оценка работы.* Диссертация Н.А. Федоровой «Математическое моделирование плоских конструкций из армированных волокнистых материалов» является завершенной научно-исследовательской работой, содержащей как теоретические, так и практические результаты. Диссертационная работа представляет собой заметный вклад в области математического моделирования армированных плоских конструкций.

*Подтверждение публикации основных результатов в научной печати.* Результаты опубликованы в 14 печатных изданиях, рекомендованных ВАК, в монографии «Математическое моделирование плоских конструкций из армированных волокнистых материалов», получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

*Оформление диссертации.* Диссертация оформлена в соответствии с требованием ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям. Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы.

Вместе с тем диссертация не лишена недостатков.

1. Не учтено давление газа на лопатки турбинного аппарата при моделировании вращающегося армированного диска газовой турбины.

2. Присутствуют технические недостатки при печати рис. 1.5, 1.11, 1.12.
3. В представленном в диссертации списке литературы нет ссылки на работы по исследованию устойчивости кольцевых армированных пластин, выполненные на кафедре ПЛА НГТУ.

Указанные замечания не отражаются на общей положительной оценке диссертации. Принимая во внимание актуальность темы, научную новизну и практическую значимость полученных результатов, считаем, что работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям в пп. 9 – 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013г., с учетом изменений, внесенных постановлением Правительства Российской Федерации «О внесении изменений в положение о присуждении ученых степеней» от 21.04.2016 г. №335, а ее автор – Федорова Наталья Александровна – заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Отзыв одобрен и утвержден на семинаре кафедры «Прочность летательных аппаратов», протокол № 8 от 25.10.2017 г.

Председатель семинара

Доктор технических наук, доцент

Заместитель заведующего кафедры прочности летательных аппаратов

В.Е. Левин

Отзыв составил

Доктор технических наук,

профессор кафедры прочности летательных аппаратов

Новосибирского государственного

технического университета

К.А. Матвеев

04 декабря 2017 г.

Подписи Матвеева Константина Александровича и Левина Владимира Евгеньевича удостоверяю:

Начальник отдела кадров НГТУ

Пустовалова Ольга Константиновна

Телефон: +7 (383) 346 -04 -31 (раб.)

E-mail: [pla@craft.nstu.ru](mailto:pla@craft.nstu.ru)

Веб. сайт НГТУ [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru) (<http://ngtu.ru>)

Почтовый адрес:

630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20; корпус 3, к. 308.