

Акционерное общество
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ
СПЕЦИАЛЬНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ»
(АО «ЦНИИСМ»)

ул.Заводская, д. 34, г.Хотьково, Сергиево-Посадский г.о.,
Московская обл., 141371
тел.8-495-993-00-11, факс 8-496-543-82-94
e-mail: tsniism@tsniism.ru
http://www.tsniism.ru
ИНН/КПП 5042003203/ 504201001

И.о. проректора по научной работе
ФГБОУ ВО "МАИ"
Равиковичу Ю. А.
125993, г. Москва, Волоколамское
ш., д. 4, МАИ, Учёный совет
тел.: 8(499)-158-43-33
факс: 8(499)-158-28-77

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«15» «08» 2024 г.

06.08.2024 № 3917/9

На № 010/1907-1 от г.

Отзыв ведущей организации
на диссертационную работу

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляю Вам отзыв ведущей организации на диссертационную работу Ермакова Ивана Сергеевича на тему «Численное моделирование растягиваемых композитных пластин с концентраторами напряжений в виде круговых отверстий», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Приложение – «Отзыв ...» в 2 экз. на 6 л. каждый.

Генеральный директор
и главный конструктор



А.Ф. Разин

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор и
главный конструктор, д.т.н.
А.Ф. Разин



08 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации АО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения» на диссертационную работу **Ермакова Ивана Сергеевича** на тему «Численное моделирование растягиваемых композитных пластин с концентраторами напряжений в виде круговых отверстий», представленную в диссертационный совет 24.2.327.07 на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность темы диссертации

Пластины, выполненные из полимерных композитов, находят широкое применение в качестве силовых элементов конструкций, имеющих жесткие ограничения по массе. Такие элементы часто имеют конструктивные вырезы, вблизи которых возникают зоны с концентрацией напряжений, поэтому создание методики для надежной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции вблизи концентратора является практически важной задачей.

В основе известных многочисленных аналитических методов расчета напряженно-деформированного состояния ортотропных пластин конечных размеров с отверстием при одноосном растяжении лежит точное аналитическое решение Лехницкого для бесконечной ортотропной пластины с одним отверстием. Практика применения такого подхода к решению рассматриваемой задачи показала, что он не гарантирует получения достоверных результатов в зоне высоких градиентов вблизи кромки отверстия.

Исходя из этого, работа Ермакова И.С., посвященная разработке эффективной методике расчета напряженно-деформированного состояния и прочности ослабленных круговыми отверстиями композитных пластин при одноосном растяжении представляется актуальной.

Анализ текста диссертации.

Диссертационная работа изложена на 142 страница текста и содержит 60 рисунков и 21 таблицу. Структура работы имеет следующий вид – введение, четыре главы

основного текста, заключение, список используемых литературных источников из 112 наименований и приложения об акте внедрения результатов работы.

Во введении обосновывается актуальность исследований, цель и задачи диссертационной работы, описаны методы исследования. Указано об имеющихся публикациях по теме диссертационной работы и перечислены мероприятия, на которых проходила апробация работы.

Первая глава диссертации посвящена обзору существующих аналитических и численных методов решения задач о напряженно-деформированном состоянии композитных пластин с отверстием при одноосном растяжении и обзору критериев их разрушения. При анализе имеющихся численных подходов к решению задачи рассматриваемого типа уделяется внимание методам численного интегрирования, конечных разностей и конечных элементов.

Также в этой главе представлена постановка задачи о напряженно-деформированном состоянии композитной ортотропной пластины в двух- и трехмерной формулировках. Эти постановки включают в себя соответствующие геометрические и физические соотношения, а также уравнения равновесия.

По результатам проведенного обзора формулируется подход к построению методики, позволяющей выполнить достоверный расчет напряженно-деформированного состояния конструкции и построить на основе полученных результатов надежный прогноз прочности конструкции. Точность полученного решения оценивается сравнением с результатами, полученными на альтернативной модели, а расчет на прочность проводится по уровню напряжений в опасной точке.

Во второй главе изложена реализация вариационно-разностной модели напряженно-деформированного состояния тонкой композитной пластины с отверстиями, уравнения равновесия для которой получены на основе принципа возможных перемещений. В рассматриваемой модели частные производные аппроксимируются центрально-разностными схемами, а неизвестные перемещения, по найденным значениям которых вычисляют напряжения и деформации, определяют решением системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса – дискретного аналога дифференциальной краевой задачи теории пластин. Особенностью метода является моделирование отверстия в виде фиктивного включения в пластину подобласти с пониженными жесткостными характеристиками. Сформулированы кинематические и силовые граничные условия, соответствующие одноосному растяжению рассматриваемой пластины, приведено описание используемых конечно-элементных моделей.

Изложены результаты исследований напряженно-деформированного состояния тонких ортотропных композитных пластин с одним и двумя отверстиями, из которых следует, что наиболее существенное влияние на величину коэффициента концентрации напряжений оказывают величина модуля сдвига материала, а также расстояние от края отверстия до свободной кромки пластины или межцентровое расстояние между отверстиями. Определено оптимальное отношение межцентрового расстояния между

отверстиями к их диаметру, доставляющее минимум коэффициента концентрации напряжений.

В третьей главе изложена реализация вариационно-разностной модели напряженно-деформированного состояния трехмерного тела в форме кругового цилиндра с центральным отверстием, выполненного из композита с цилиндрической ортотропией физико-механических характеристик. Сформулирована краевая задача для диаметрального растяжения тела под действием симметричной нагрузки, распределенной по окружной координате по гармоническому закону и постоянной вдоль оси вращения. Также построена двумерная математическая модель, описывающая напряженно-деформированное состояние поперечного сечения цилиндра. Для ее численной реализации применяется метод ортогональной прогонки Годунова с численным интегрированием по методу Кутты-Мерсона.

Представлены результаты исследований напряженно-деформированного состояния пространственного цилиндрического тела и тонкой круглой пластины, имеющих центральное отверстие. Рассмотрены варианты исполнения этих конструкций из изотропного материала, а также из ортотропных композитов двух видов: с ортогональной и цилиндрической ортотропией. Из анализа полученных результатов следует, что окружные напряжения на кромке отверстия в уровне срединной поверхности превосходят по величине напряжения, реализующиеся в уровне внешней поверхности, для обоих рассмотренных типов ортотропии материала. Установлено, что даже при толщине пластины порядка двух диаметров отверстия допустимо проводить расчеты полей напряженно-деформированного состояния с применением двумерной модели, так как полученные по ней результаты незначительно отличаются от результатов трехмерного решения.

Четвертая глава диссертации посвящена применению разработанной методики анализа прочности композитных пластин с отверстиями. Подробно описан способ расчета предельных растягивающих нагрузок для пластин с разным типом укладки и количеством слоев композита. Для проверки достоверности предложенного метода проведены расчеты прочности образцов с различным количеством отверстий, результаты которых сопоставлялись с результатами натуральных экспериментов, проведенных автором или заимствованных из литературных источников. Теоретические результаты, полученные автором, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Приведены результаты анализа влияния отверстий на прочность рассматриваемых пластин, свидетельствующие, в частности, о том, что разрушающая разрывная нагрузка для пластины с центрально расположенным отверстием оказывается ниже, чем для пластин с увеличенным количеством отверстий (двумя и тремя), отстоящих друг от друга по продольной координате.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана методика получения достоверного численного решения задач, о напряженно-деформированном состоянии композитных пластин, ослабленных круговыми отверстиями, при одноосном растяжении, основанная на совместном применении нескольких альтернативных математических моделей. В рамках единого алгоритма рассматриваются ортотропные пластины как с однородной структурой стенки на основе однонаправленных волокон или слоев ткани, так и многослойной структуры, образованной чередованием слоев с различной ориентацией армирующих волокон.

2. Для случая одноосного растяжения композитных пластин с отверстиями выполнены параметрические исследования по влиянию схем расположения отверстий, их размеров, физико-механических свойств материала и геометрических характеристик пластин на уровень напряжений в зонах концентрации вблизи отверстий. Установлены закономерности влияния перечисленных параметров на прочность рассматриваемых пластин.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке на основе вариационно-разностного метода алгоритма и программы для расчета напряженно-деформированного состояния композитных пластин, ослабленных круговыми отверстиями, при одноосном растяжении. На основе разработанного алгоритма и реализующей его вычислительной программы, а также с применением высокоуровневых расчетных схем (конечно-элементных моделей) построена методика получения надежного численного решения задач о напряженно-деформированном состоянии композитных пластин.

Практическая значимость работы заключается в выработке и обосновании практических рекомендаций по снижению концентрации напряжений в элементах конструкций рассматриваемого типа, в предложенном методе расчета их на прочность, отличающемся относительной простотой и высокой надежностью, а также во внедрении результатов работы в расчетную практику АО «ЦНИИмаш».

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием результатов численного моделирования с ранее полученными теоретическими результатами, а также с данными вычислительных и натурных экспериментов.

Общая оценка и замечания по диссертационной работе

По рассматриваемой работе могут быть сформулированы следующие замечания.

1. В таблице 2.1 представлены безразмерные значения модуля упругости E_2 и модуля сдвига G_{12} , отнесенные к модулю упругости E_1 . Представляет интерес абсолютные значения указанных величин, при которых проводили расчёт.

2. Проведенные исследования влияния физико-механических свойств материала на напряженно-деформированное состояние толстой ортотропной пластины с одним

отверстием, описанные в разделе 3.2, ограничены конструкциями из стеклопластиков, армированных тканью. Несомненную научную и практическую значимость представляло бы расширение этого исследования на класс конструкций с неоднородной структурой стенки, образованной слоями однонаправленного материала с различной ориентацией армирующих волокон.

3. Математическая модель тонкой круглой ортотропной пластины описана весьма лаконично. Более подробное описание ее реализации представляло бы практический интерес в силу ее более экономичности по сравнению с трехмерной моделью при незначительных отличиях в результатах расчета по обоим моделям.

4. Работа выиграла бы в наглядности от включения в нее иллюстраций сложной сетки конечно-элементных моделей с двумя, тремя и восемью отверстиями.

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки работы, поскольку в основном они носят характер рекомендаций, которые автор мог бы учесть в своей дальнейшей деятельности.

Материал диссертации изложен грамотно, сопровождается достаточным количеством графических иллюстраций и таблиц.

Автореферат в полной мере отражает содержание и основные результаты исследования.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела».

Заключение

Диссертация Ермакова Ивана Сергеевича «Численное моделирование растягиваемых композитных пластин с концентраторами напряжений в виде круговых отверстий» на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченной научно-квалифицированной работой, выполненной на высоком научном уровне и на актуальную тему, которая содержит практически значимые результаты. По результатам исследований опубликовано 7 научных работ, входящих в перечень ВАК РФ.

Результаты диссертационной работы внедрены в расчетную практику АО «ЦНИИмаш» и используются при проведении прочностных расчетов композитных пластин с отверстиями, о чем имеется акт внедрения. Практическую значимость работы и ее прикладной характер подчеркивает возможность внедрения результатов диссертации в практику проектирования промышленных предприятий и конструкторских бюро (таких, как ПАО «РКК «Энергия», АО «Композит», АО «РКЦ «Прогресс» и др.) и в учебный процесс кафедр технических ВУЗов, связанных с подготовкой специалистов в области механики композитных конструкций.

Представленная диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ, которые предъявляются к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела» и требованиям «Положение о порядке присуждения ученых степеней», а

соискатель Ермаков Иван Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв ведущей организации диссертационной работы Ермакова И.С. рассмотрен и одобрен на заседании секции №3 научно-технического совета АО «ЦНИИСМ», присутствовало 7 человек, протокол №4 от «б» августа 2024г.

Начальник отделения «Центр прочности»
Акционерного общества «Центральный
научно-исследовательский институт
специального машиностроения»,
зам. главного конструктора по прочности,
канд. техн. наук по специальностям
05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ,
01.02.04 – Механика деформируемого
твердого тела

Каледин Владимир Олегович

Адрес организации: Российская Федерация, 141371, г. Хотьково Московской области, ул. Заводская, д. 34

e-mail: tsniism@tsniism.ru

Тел.: (495)993-00-11, **факс:** 8(496)543-82-94

Сайт: <http://tsniism.ru>

Подпись Владимира Олеговича Каледина
удостоверяю.



Секретарь научно-
совета АО «ЦНИИСМ»
Г.В. Краснова

С отзывом ознакомлен Ермаков И.С.
15.08.2024