

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертационную работу Малахова Андрея Викторовича
«Моделирование полимерных композитных материалов с неоднородной
структурой армирования на основе криволинейных траекторий
волокон», представленную на соискание учёной степени
кандидата технических наук по специальности 1.1.8.
«Механика деформируемого твёрдого тела».

Актуальность темы исследования

Работа Малахова Андрея Викторовича посвящена разработке и применению численного метода определения напряженно деформированного состояния изделий из полимерных композитных материалов (ПКМ), армированных непрерывными волокнами. Волокна в изделии сами по себе являются концентраторами напряжений. Кроме этого, в изделии возможны концентраторы связанные с резким изменением геометрии тела, с наличием различных отверстий и инородных включений. Вблизи отверстий и включений напряжения, за счет концентрации, могут существенно превысить предел прочности материала изделия и привести к непредсказуемым последствиям. Чтобы уменьшить напряжения вблизи концентраторов предложено искривлять армировочные волокна вблизи границы включения и тем самым разгрузить окрестность концентратора. Укладывать волокна предлагается по линиям главных напряжений в изделии. Для этого предварительно нужно решить задачу об определении напряжений в изделии без армировки волокнами при заданных рабочих условиях. Рассчитать траектории главных напряжений вблизи концентратора, затем смоделировать новое геометрически подобное изделие с армировкой, уложенной вдоль линий главных напряжений. После этого снова провести расчет упрочненного изделия, при таких же рабочих условиях. Если критерий прочности не нарушен, то изделие считается готовым к употреблению. В противном случае необходимо либо провести более плотную армировку, либо использовать более прочные волокна. Похожая схема более подробно рассмотрена в третьей главе.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованной литературы. Материал изложен на 117 страницах и включает в себя текст, 78 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 151 наименований. Оформление диссертации соответствует требованиям, установленным правилам и стандартам.

Во введении обосновывается актуальность основной темы диссертации о необходимости упрочнения областей, примыкающих к концентратору, с помощью криволинейных волокон из высокопрочного материала. Определяется последовательность действий для достижения поставленной цели. Описывается объект исследования и методы решения

возникающих при этом проблем. Дается краткий обзор работ других авторов по схожей тематике. Подчеркивается, что по теме диссертации автором совместно с коллегами опубликовано 15 научных работ, 13 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК и Skopus/Web of Science.

В первой главе излагаются основные принципы создания биологических материалов, благодаря которым становится возможным достичь наилучших характеристик в природных структурах. На основе этих принципов проводится проектирование, моделирование и оптимизация неоднородных синтетических композитных материалов с криволинейной структурой армирования, реализация которой обеспечивается за счёт локального изменения ориентации и объёмной доли волокон. Приводится обзор различных подходов и методов моделирования, а также способов изготовления композитных структур переменной жёсткости.

Во второй главе приводится краткий обзор математического аппарата, необходимого для описания деформирования и разрушения композитов при различных структурах армирования. При анализе распределения структурных напряжений в композитах с высокопрочными и высокомодульными волокнами использовались уравнения линейной теории анизотропной упругости. Для оценки нарушения прочности использовались критерии учитывающие различные механизмы разрушения.

В третьей главе рассматривается методика построения вектора направлений максимального главного напряжения в окрестности концентратора. Следуя этим направлениям, укладываются упрочняющие волокна, на основе которых создаётся структура армирования композитных пластин с различными концентраторами напряжений. Для анализа прогрессирующего разрушения с учётом накопления повреждений в процессе нагружения пластин используется метод деградации свойств материала. Разработан алгоритм итерационного построения композитных структур с криволинейными траекториями волокон, согласующимися с неоднородными полями напряжений. Оценена точность вычисления коэффициентов концентрации напряжений (традиционного и в пересчете «на волокно») в зависимости от плотности применяемой сетки конечных элементов. Реализована процедура учёта накопления повреждений в процессе нагружения путем использования коэффициентов деградации локальных свойств при возникновении разрушений некоторых волокон или связующего.

Четвёртая глава Данная глава посвящена моделированию композитных пластин с различными концентраторами напряжений, видами нагружения и схемами армирования. Проведен анализ влияния структуры армирования на механическое поведение композитов переменной жёсткости. Рассчитаны напряженно-деформированные состояния и предельные нагрузки для композитных пластин, армированных как однонаправленными волокнами, так и криволинейными. Разработанная методология построения

непрерывных траекторий волокон, согласованных с полями возникающих в детали напряжений, была реализована с помощью трехмерной печати узлов крепления, и она показала свою большую эффективность по сравнению с использованием традиционных схем армирования прямолинейными волокнами.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные лично автором диссертации.

Научная новизна

В диссертационной работе разработана методика упрочнения криволинейными волокнами пластин с различными концентраторами напряжений. Некоторые способы упрочнения были основаны на наблюдениях за природными объектами. Проверка различных способов упрочнения проводилась путём численного и экспериментального моделирования.

Практическая ценность

Конструкции и изделия с концентраторами различной природы распространены очень широко. При нагружении таких изделий напряжения вблизи концентратора могут превысить допустимые величины и привести к катастрофическим последствиям. Поэтому способы минимизации напряжений в окрестности концентратора имеют очень большую теоретическую и практическую ценность.

Достоверность

Научные положения, выводы и рекомендации диссертации являются достоверными, так как они получены на основании решения общеизвестных уравнений прочности. Разработанная методика и программа проверена путём сравнения расчётов по авторской методике с экспериментами и расчётами по давно апробированной методике численных расчётов.

Замечания

1. На странице 25 диссертации написано, что *«Для анализа напряженно-деформированных состояний в композитных материалах приходится использовать определяющие соотношения.»* А как по-другому?

2. Формулы (2.25) на странице 31 представляют собой эффективные свойства по Фойхту и Рейссу. Они образуют вилку Фойхта – Рейсса, внутри которой располагаются истинные эффективные модули, учитывающие кроме объёмных долей форму и расположение волокон. В диссертационной работе эффективный модуль вдоль волокон взят по Фойхту, а эффективный модуль поперёк волокон - по Рейссу

Заключение

В целом диссертация Малахова Андрея Викторовича выполнена на высоком уровне, соответствующем ученой степени кандидата технических наук по специальности механика деформируемого тела.

Разработан численно аналитический метод расчёта изделий с концентраторами различной природы. Предложены и проверены различные способы армирования окрестности концентраторов высокопрочными нитями, которые позволяют в этой области существенно уменьшить интенсивность напряжений и тем самым обеспечить целостность и безопасность изделий.

Достоверность результатов обеспечивается строгим решением задач неоднородной анизотропной упругости (с помощью МКЭ в программном комплексе ANSYS), а также сравнением теоретических, численных и экспериментальных результатов.

Основные результаты диссертации изложены в 15 публикациях. В том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, и 13 статей в журналах, включённых в международную реферативную базу данных и систем цитирования Scopus/Web of Science, соответственно.

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и полученные автором основные результаты.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Считаю, что диссертационная работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (п. 9), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор **Малахов Андрей Викторович** заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемых твердых тел, профессор, заведующий кафедрой «Механики композитов» Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

25 апреля 2024 г.

Горбачев Владимир Иванович

Почтовый адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, механико-математический факультет, кафедра механики композитов

Контактный телефон: +7(903)772-95-13

Адрес электронной почты: vigorby@mail.ru

Подпись д. ф.-м. н., профессора Горбачева В.И. *Модостоверно*

Декан механико-математического факультета

Член-корреспондент АН, профессор

С отзывом ознакомлен

02.05.2024 Молч

