

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Каюмова Рашита Абдулхаковича на диссертацию Русланцева Андрея Николаевича по теме «Разработка моделей деформирования полимерных волокнистых слоёв с различной укладкой», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04– «Механика деформируемого твёрдого тела».

1. Актуальность темы диссертации

Рецензируемая диссертационная работа относится к теоретико-экспериментальным исследованиям, связанным с разработкой моделей деформирования полимерных волокнистых слоёв и изделий из них в различных условиях нагружения. Выбранное диссертантом направление исследования, касающееся оценки деформационно-прочностных характеристик полимерных композитных материалов, а также прогнозирования поведения этих материалов в особых жёстких условиях длительной эксплуатации, является несомненно актуальным. Актуальными являются также и решения сложных задач расчёта панелей зеркал космических аппаратов и элементов лонжеронов летательных аппаратов.

2. Достоверность и новизна выводов и результатов исследований

Достоверность основных научных результатов обеспечивается корректностью применения строгих математических методов для построения основных соотношений, хорошо апробированных моделей механики деформируемых твердых тел, использованием апробированных коммерческих программных комплексов конечно-элементного моделирования, согласованностью полученных результатов численных расчетов с результатами экспериментальных данных и известными результатами, полученными другими авторами.

Научную новизну имеют следующие полученные автором результаты:

1. Разработаны модели расчётов нелинейного и вязкоупругого деформирования полимерных волокнистых слоёв, которые позволяют заметно упростить расчёты в задачах вибрационного и динамического анализа и изделий из них, образованных косоугольной укладкой, в различных условиях нагружения.
2. Разработанная автором модель деформирования криволинейной слоистой композитной балки позволяет получать аналитические решения, которые могут быть использованы для более точной оценки несущей способности такого элемента, а также для верификации других, например, различных численных методов.

Таким образом, конструкторам и технологам даётся инструмент для расчета параметров проектируемых композиционных материалов и изделий на их основе. Полученные результаты и выводы по работе показывают, что проблемы, поставленные автором и сформулированные в ходе проведённых научных исследований, решены успешно и в полном объёме.

Структура диссертации Русланцева Андрея Николаевича является традиционной и соответствует требованиям ВАК РФ. Она состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 192 наименований. Диссертация изложена на 172 страницах, включая 75 рисунков и 14 таблиц. Принципиальных замечаний к оформлению диссертации и автореферата нет.

3. Значимость выполненной работы для науки и техники

Диссертационная работа представляет собой серьезный вклад в механику композитов, поскольку разработанные математические модели позволяют более чётко понимать поведение слоёв композиционных материалов в различных условиях нагружения, что представляет определённый научный интерес.

Также проведённая работа по расчёту элементов центральной части зеркала космического аппарата «Спектр-М» может позволить устранить ряд недостатков конструкции, что имеет явное практическое применение.

Диссертант творчески подошёл к процессу моделирования поведения композитных материалов и изделий из них, провел большую экспериментальную работу по подтверждению и уточнению предложенной теоретической модели.

4. Оценка содержания диссертации, ее завершенности

Во введении обоснована актуальность работы, показана степень проработанности проблемы, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

В первой главе на основании обзора литературы формулируется научная проблема. Диссертант рассматривает применение волокнистых композиционных материалов в изделиях авиационно-космической техники, приводит обзор моделей поведения и методов расчета напряженно деформированного состояния слоистых композиционных материалов при нелинейном деформировании, а также деформирования материалов при переменном во времени нагружении. Проводится анализ критериев разрушения композитов. В главе показано, что линейные модели не позволяют учесть ряд значимых эффектов при деформировании реальных материалов. **Во второй главе** приводится методика испытаний плоских образцов различных угле- и стеклопластиков, в том числе с перекрёстным армированием. Диссертантом выполнено планирование испытаний, и проведены квазистатические и циклические испытания углепластика КМУ-4Л и углепластика на основе высокотемпературного связующего БМИ-3/3692, а также представлены результаты испытаний стеклопластика при квазистатическом нагружении под углом к направлению армирования. По линейным участкам диаграмм деформирования определены упругие постоянные материалов.

Третья глава диссертации посвящена созданию моделей поведения композитных слоев и изделий из них, позволяющих по упругим характеристикам однонаправленного слоя и аппроксимации нелинейной диаграммы деформирования при сдвиге в плоскости слоя прогнозировать картину нелинейного деформирования пакетов с различными схемами армирования при сложном напряженно-деформированном состоянии. Выполнены расчеты деформирования таких материалов и изделий из них, показана применимость модели для широкого спектра материалов, таких как углепластики на основе термореактивных и термопластичных связующих, стеклопластики, а также углерод-углеродные композиционные материалы. Показано хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных. Средняя относительная ошибка по сравнению с линейной моделью уменьшена в 2,8 раза, а средняя квадратическая ошибка – в 3,3 раза.

Четвертая глава диссертации посвящена модели, позволяющей описывать временные эффекты при деформировании композитных конструкций. В рамках работы диссертантом получены выражения для матриц жесткости и податливости в операторном виде, которые могут быть использованы в численных и аналитических расчетах. Для испытанных образцов показано хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных. Средняя относительная ошибка по

сравнению с линейной моделью уменьшена в 2,3 раза, а средняя квадратическая ошибка – в 2,0 раза.

Показано применение модели на примере расчета деформаций центральной части главного зеркала космических аппаратов проекта «Миллиметр» при хранении.

Пятая глава целиком посвящена расчётам деформирования криволинейной композитной балки, а именно определению напряжений в балках с изменяющимся по толщине модулем упругости. Получены аналитические выражения для определения радиальных и продольных напряжений в балке, продемонстрировано, что наиболее опасной является центральная часть балки, проведена оценка оптимальных соотношений прочности материала в продольном и радиальном направлении. Выполнен эксперимент, подтверждающий применимость принятой в работе гипотезы о распределении напряжений по толщине слоистой криволинейной балке. Разработанная модель применена для расчёта космического аппарата «Спектр-М».

5. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации и соответствия содержания автореферата ее положениям

Основные результаты диссертации представлены для обсуждения научной общественности и опубликованы в 20 научных работах, из которых 3 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертации.

6. Замечания.

6.1. В главе 5 задача об изгибе криволинейной композитной балки решалась в плоской постановке. При этом в случае слоистых балок и арок не может учитываться кромочный эффект, который возникает ввиду появления стеснения деформированию слоев поперек балки, вызываемого наличием разных коэффициентов Пуассона в разных слоях. Поэтому задача становится трехмерной, а не плоской. Таким образом, решение справедливо только при одинаковых коэффициентах Пуассона слоев.

6.2. Нелинейно упругие соотношения для касательных напряжений приняты в виде, предложенном в работе Образцова И.Ф., Васильева В.В., но уже конкретизированные для рассматриваемых материалов или в виде полилинейной, или в виде степенной функции. Однако не поясняется, в каких случаях (в каких задачах) можно пользоваться таким вариантом физических соотношений, поскольку в них не учитывается деформация ползучести (наследственно упругая или необратимая), которая зависит от скорости деформации. Таким образом, неясно, как выбирать параметры нелинейных соотношений, поскольку при разных скоростях нагружения в эксперименте они будут получаться разными. Т.е., неясно, в каких случаях задачу ползучести или релаксации можно заменить задачей нелинейной теории упругости.

6.3. В работе модуль упругости образца определяется как обычно по линейному участку диаграммы деформирования. Однако при использовании ядра Абеля даже при малых временах нагружения деформация ползучести может иметь значение того же порядка, что и упругая составляющая. В работе нет оценки вклада деформации ползучести при вычислении начального модуля упругости. Вычисление и уточнение начального модуля упругости можно было бы делать апостериорно, поскольку параметры ядра ползучести уже определены, пусть даже вначале приближенно. Если этот вклад большой, то нужно уточнять начальный модуль упругости и параметры ядра ползучести итерационно. Но при этом остается все же открытым вопрос о

