

В диссертационный совет Д 002.024.03 при
Институте прикладной математики им.
М.В.Келдыша РАН
по адресу 125047, г. Москва, Миусская
пл., д. 4.

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора

Лурье Сергея Альбертовича на диссертационную работу

ЯКОВЛЕВА МАКСИМА ЯКОВЛЕВИЧА

«Моделирование эффективных механических характеристик резинокорда при конечных деформациях», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук

по специальности

05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность рецензируемой работы. Диссертационная работа Яковлева Максима Яковлевича посвящена разработке методики оценки эффективных механических характеристик композитных материалов для случая конечных деформаций и физической нелинейности определяющих соотношений, построению алгоритмов численного решения задачи расчета эффективных характеристик, реализации этого алгоритма в виде программного модуля. Моделирование и прогноз эффективных механических характеристик является основным и обязательным этапом при описании процессов деформирования и оценки напряженно-деформированного состояния сложных композитных структур. Эта проблема является особенно сложной и нерешенной в полной мере до настоящего времени в случае конечных деформаций для резинокордовых в структур, находящих самое широкое применение в конструкциях широкого применения, начиная от приводных ремней, транспортёрных лент, шлангов высокого давления и вплоть до резинокордовых конструкций шин. Поэтому тема диссертации, в которой дается решение проблемы моделирования и прогноза эффективных свойств для композитных структур типа резинокордовых структур с учетом геометрической (и отчасти физической) нелинейности, несомненно является **актуальной**.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Обоснованными представляются научные положения, сформулированные в диссертации и положенные в основу моделирования эффективных свойств композитов с резиноподобной матрицей и армирующим

кордом. Они учитывают научный опыт, накопленный в области моделирования резиноподобных материалов (используются модифицированные определяющие соотношения Муни-Ривлина) и в области моделирования физически-нелинейных материалов (соотношения Мурнагана). Обосновано используются известные положения механики композиционных материалов, а также хорошо апробированные алгоритмы и авторские, программные комплексы, прошедшие всестороннее тестирование. Предложенные алгоритмы, программы прошли тщательное тестирование. Поэтому обоснованными являются выводы и рекомендации, сделанные по результатам расчета. Они полностью согласуются также с физическими представлениями.

Достоверность полученных результатов обосновывается, применением строгих положений механики деформируемых сред т.е. адекватных положений механики деформируемых сред в случае конечных деформаций для описании напряженно- деформированного состояния, многократно обоснованных и тестированных определяющих соотношений для резиноподобных материалов со слабой сжимаемостью, использованием корректных физических соотношений для физически нелинейных материалов, сравнением полученных численно известными результатами, полученными для более частных типов композитов, а также с известными результатами полученными независимо другими авторами.

Теоретическая значимость. Научная новизна полученных в диссертации результатов определяется предложенной моделью резинокорда, которая позволяет моделировать эффективные свойства резинокорда, учитывая конечность деформаций, слабую сжимаемость матрицы и физическую нелинейность корда (армирования). В значительной степени новыми представляются также методика моделирования и прогноз эффективных свойств, т.е. и алгоритм и программный модуль, которые позволили создать методику оценки эффективных свойств, учесть влияние нелинейных эффектов. Теоретическая значимость полученных результатов, достаточно велика, ибо значимыми являются любые новые и нетривиальные решения в механике деформируемых сред с конечными деформациями. Более того, в диссертации полученные решения относятся к проблеме моделирования и прогноза эффективных свойств нелинейно деформируемых композитов, которые реализованы с помощью реальных алгоритмов и программных модулей.

Практическая значимость. Практическая значимость полученных результатов существенна, так как разработанные алгоритм и методика и оценки эффективных механических характеристик резинокордных композитов могут быть использованы при инженерных прочностных расчётах для широкого класса резинокордных конструкций (автомобильных шин, шлангов высокого давления, рукавов, уплотнительных манжет, резиновых гусениц, резинокордных дорожных покрытий и настилов и пр.) и для оценки эффективных свойств других анизотропных

композитных материалов, армирующие элементы которых выполнены из физически нелинейного материала, а матрица претерпевает конечные деформации (например, композиты, содержащие армирующие элементы выполненные из материалов с памятью формы).

Оценка содержания диссертации, ее завершенность.

Во введении приведено краткое содержание диссертации, описано понятие резинокордного материала, дан обзор литературы по исследованию эффективных механических характеристик неоднородных материалов в общем случае и по исследованию свойств резинокорда. Обоснована актуальность темы исследования. Сформулированы цели и задачи работы. Обоснованы новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов

В первой главе изложены основные соотношения нелинейной теории упругости. Приводятся основные определения и обозначения, используемые в работе. Описана постановка краевой задачи нелинейной теории упругости. Приведены используемые в работе определяющие соотношения Мурнагана (с помощью которых описываются механические свойства корда) и Муни-Ривлина (используемые для моделирования резины).

Во второй главе приводится алгоритм определения эффективного материала для композита как однородного материала, удовлетворяющего условию, сформулирован критерий осреднения. Приводится алгоритм численной оценки эффективных свойств резинокорда:

-для представительного объема сформулированы "базовая" последовательность краевых задач теории упругости. Разные задачи в рамках одной последовательности различаются величиной деформации.

-в результате решения каждой задачи определяется поле распределения тензора истинных напряжений. Тензор истинных напряжений осредняется по объёму, по нему для каждой задачи вычисляется второй тензор напряжений Пиолы-Кирхгофа, -эффективные свойства резинокорда оцениваются в виде зависимости осреднённого тензора Пиолы-Кирхгофа от осреднённого тензора Грина (коэффициенты которой вычисляются с использованием метода наименьших квадратов)

В главе также дана модификация типов прикладываемой в рамках алгоритма нагрузки, учитывающая слабую сжимаемость резины: при растяжении/сжатии представительного объема в одном направлении задаётся сжатие/растяжение его в другом направлении (других направлениях) - с расчётом, чтобы объём модели не менялся (или практически не менялся). Обсуждаются граничные условия для представительного объема, делается попытка дать обоснование необходимости использования периодических граничных условий при оценке эффективных механических свойств резинокорда и других подобных материалов. Также в конце главы кратко описан разработанный программный модуль (вошедший в состав CAE FIDESYS),

реализующий алгоритм.

Третья глава посвящена сравнению численных результатов, полученных с помощью разработанного программного модуля, с аналитическими формулами (верификации). Проверялось совпадение численных результатов с известными аналитическими результатами, полученными для волокнистого материала. Для нелинейных эффективных свойств резинокорда также проводилась проверка наличия сеточной сходимости при уменьшении характерного размера конечного элемента («измельчения» сетки).

В четвёртой главе исследуются результаты численной оценки эффективных характеристик резинокорда при конечных деформациях. Приводятся зависимости свойств резинокорда от четырёх параметров:

- от упругих свойств корда
- от упругих свойств резины
- от частоты расположения нитей корда в слое. Шаг нитей варьируется в пределах от 50 до 100 нитей на 10 см
- от угла наклона нитей корда - т.е. угла между нитями в слоях и осью X . Угол варьируется в пределах от 10 до 80 градусов

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы. Содержание диссертации соответствует поставленной цели исследования. В целом автор диссертационной работы продемонстрировал необходимый квалификационный уровень научно-технического владения темой, которой посвящена диссертация. Диссертационная работа ЯКОВЛЕВА М. Я. представляет завершённое исследование.

Недостатки в содержании и оформлении диссертации. По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Для реализации процедуры осреднения был выбран представительный объём резинокордового материала, который относится к классу слоисто-волокнистых композитов. Данный материал относится к классу слоисто-волокнистых композитов с высокоэластичной матрицей. На мой взгляд, имело бы смысл дать пояснение по выбору его размеров. Данная проблема наиболее актуальна для дисперсных композитов, к которым резинокорд не относится.
2. Для решения проблемы осреднения в работе привлекался критерий средних напряжений, используемый в работах научного руководителя диссертанта. Вопрос выбора критериев не обсуждается в диссертации. Для ряда типов композитов выбор критерия существенно влияет на точность оценок эффективных свойств. Отметим, что существует много критериев осреднения. Например, энергетический критерий, критерий Эшелби (метод

трех фаз и пр.) В работе, выполненной для случая конечных деформаций, не проводился сравнительный анализ критериев осреднения и выбор наиболее эффективного из них, в зависимости, например, от объемной концентрации корда в композите.

3. В работе, в качестве основы для определения эффективных свойств использовался набор из 21 базовых испытаний, в рамках каждого из которых изменялась амплитуда задаваемых деформаций. Однако в работе нет детального анализа влияния выбора базовых испытаний на результат осреднения. Имеется субъективность в реализации алгоритма в этой части. При этом существование решения, которое было установлено путем реализации предложенного алгоритма, не дает ответа на вопрос о достаточности базовых испытаний для рассмотренных композитов с произвольными характеристиками матрицы и армирования, ибо в работе параметры матрицы и армирования варьировались в небольших диапазонах. Т.е. полученные результаты говорят о приемлемости выбранного списка испытаний лишь для конкретного диапазона компонент композита, рассмотренных в работе. Желательна была бы численная оценка устойчивости результатов моделирования по отношению к изменению выбранного базиса численных испытаний.
4. В диссертации нет детального исследования вопроса о реализуемости выбранного списка испытаний и модификации его за счет параметров, входящих в определение задаваемых в испытаниях компонент тензора деформаций (см. стр. 35-38). На мой взгляд, имеет место неединственность предложенной модификации. Желательно было бы исследовать, как это сказывается на значениях эффективных жесткостей. Поэтому появляется фактор субъективности при реализации алгоритма.
5. Предложенный алгоритм содержит, по существу, два этапа, один из них состоит в аппроксимации зависимости деформаций (напряжений) от амплитуды нагружения квадратичной зависимостью, а второй связан с непосредственной процедурой определения коэффициентов в определяющих соотношениях их системы алгебраических уравнений.
На первом из этих этапов фактически решается обратная задача идентификации параметров модели. К сожалению, известные проблемы возможной неустойчивости решения по отношению к малым изменениям входных параметров, условиям нагружения, параметров нагружения и пр. в работе не обсуждаются.
6. Рисунок, приведенный на стр. 43, судя по тексту должен пояснять картину деформирования представительного элемента. Однако этот рисунок сделан в высшей степени неудачно, на нем отсутствуют какие-либо обозначения, нет даже обозначений

осей координат.

7. Замечания, сделанные относительно периодических граничных условий, должны быть более чёткими, ибо ничего не говорится об их согласованности с условиями (2.1.2).
8. В главе 3, на стр. 47, говорится, что «приведено сравнение эффективных свойств однослойного и двуслойного резинокорда, полученных численным и аналитическим путём, для линейного случая».

Однако для линейного случая численная процедура, вырождается, так как первая часть алгоритма, связанная с квадратичной аппроксимацией модулей в зависимости от амплитуды нагружения отсутствует, т.е. алгоритм в указанном смысле вырождается. Более того, так как в линейном случае имеют место теоремы существования и единственности, то сделанное сравнение является тривиальным, для каких бы структур оно не приводилось. Такие сравнения не могут служить оценкой эффективности алгоритма и программы, оно лишь подтверждает правильность вычислений при определении напряженно-деформированного состояния в рамках линейной упругости и правильность использования известных соотношений механик композитов, что является хоть и обязательным этапом но и тривиальным в то же время с точки зрения рассматриваемой в диссертации проблемы.

Считаю поэтому, что разделы 3.2-3.3 могли быть существенно сокращены. И выводы, сделанные в п. 3.5, не в полной мере относятся к развиваемому алгоритму. Исключением здесь является тестирование, осуществленное для материала Мурнагана. Этот пример действительно имеет отношение к развиваемому алгоритму, хотя было бы полезным, как минимум, дать численную проверку алгоритма и программ еще и для материала Муни-Ривлина.

9. Имеется и ряд незначительных недостатков по тексту диссертации. Например, в п. 1.3 приводятся только статические граничные условия, другие условия не обсуждаются, в то время как при реализации алгоритма используются кинематические граничные условия.

На мой взгляд, замечания, приведённые в пунктах 1-4, могут стать основой как для новых исследований других диссертантов, так и будущей исследовательской работы автора диссертации.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, содержит основные положения диссертационной работы и выводы.

Диссертация и автореферат соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11 – 2011. Система

стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. М.: Стандартинформ. – 2012.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку работы в целом. Диссертационная работа представляет собой завершённое исследование, посвящённое решению актуальной проблемы, апробирована на научных семинарах и конференциях различного уровня, включая международные.

Она является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор ЯКОВЛЕВ МАКСИМ ЯКОВЛЕВИЧ, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,

доктор технических наук, профессор,

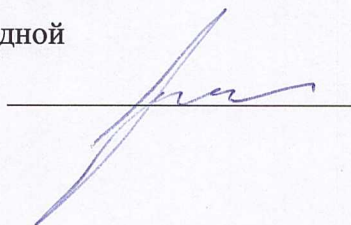
заведующий лабораторией «Неклассические

модели механики композитных материалов и конструкций»

Федерального государственного бюджетного

Учреждения науки Института прикладной

механики РАН



С.А. Лурье

16.01.2015 г.

125040, г. Москва, Ленинградский пр. 7, стр. 1

Телефон: +7(495)9461806, +7(499)1356190

E-mail: lurie@ccas.ru

Подпись профессора Лурье С.А. удостоверяю

Ученый секретарь ИПРИМ РАН

К.ф.-м.н.

