

ОТЗЫВ

официального оппонента, к.ф.-м.н. Волкова-Богородского Д.Б.,

на диссертационную работу

ЕГОЛЕВОЙ ЕКАТЕРИНЫ СЕРГЕЕВНЫ

«Моделирование деформирования тонких пластин из композиционных

материалов с высокотемпературными фазовыми превращениями»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого

твердого тела»

Актуальность диссертационного исследования.

Диссертационная работа посвящена разработке термомеханических моделей и численному моделированию композиционных материалов с многостадийными фазовыми превращениями, которые позволяют учитывать кинетику изменения микроструктуры в матрице и волокнах при высокотемпературном нестационарном нагреве. Композитные пластины и оболочки применяются практически во всех областях техники, и сфера их применения постоянно расширяется, поэтому к материалам, лежащим в их основе, предъявляются все более повышенные требования по механическим, электрическим и теплофизическим свойствам. Насколько эффективно реализуются высокие физико-механические свойства армирующих элементов (волокон) зависит во многом от свойств матрицы композита: ее прочности, жесткости, термостойкости, пластичности, вязкости и т.д. Следует отметить, что многослойные композитные пластины на основе неорганических связующих с многостадийными фазовыми превращениями являются перспективным классом материалов для создания огнестойких и защитных конструкций, работающих в экстремальных условиях. Они эффективно используются в промышленности, на транспорте, в космической технике и других областях деятельности человека. Поэтому развитие математических методов и моделей, которые бы позволяли эффективно описывать и проводить расчеты происходящих в них процессов является **актуальной задачей**. Использование таких моделей механического поведения конструктивных элементов из высокотемпературных композитов, а также разработка математически

обоснованных методов их расчета, коррелирующих с известными классическими теориями, позволяет увеличить точность оценки получаемых в ходе инженерных расчетов значений напряжений и деформаций.

Научная новизна работы состоит в следующих основных результатах, полученных лично автором:

- 1) разработана новая многоуровневая модель расчета эффективных термомеханических характеристик тканевых композиционных материалов с многостадийными фазовыми превращениями в матрице и волокнах при высоких температурах, и на основе этой модели построены определяющие соотношения для ортотропных композитов;
- 2) разработан модифицированный вариант асимптотической теории усреднения для расчета тонких многослойных пластин в случае высокотемпературных композитов с многостадийными фазовыми превращениями, и проведены тестовые расчеты в рамках асимптотической теории первого и второго порядка в сопоставлении с конечно-элементным методом, подтверждающие обоснованность такого подхода.

Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, подтверждается корректной постановкой задач, которые решаются математически обоснованными методами с применением классических теоретических принципов, а также сравнением полученных результатов с известными решениями, полученными по классической теории и в результате прямого конечно-элементного моделирования в общепринятом коммерческом программном комплексе.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в построении определяющих соотношений для высокотемпературных композиционных материалов при развивающихся в компонентах композита при нагреве до рабочих температур физико-химических превращениях. Построенные таким образом определяющие соотношения использованы при расчете методом асимптотического усреднения напряженно-деформированного состояния тонкой многослойной пластины с учетом конечных сдвиговых характеристик. Разработанный подход может быть применен в инженерных расчетах для оценки динамики напряжений и деформаций в элементах конструкций из композитов с фазовыми превращениями.

Публикации и апробация работы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, в том числе в 5 статьях в журналах из

Перечня Высшей аттестационной комиссии и в 2 публикациях в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Апробация результатов диссертации проводилась на различных международных научных конференциях.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и заключения, списка литературы из 70 наименований. Объем диссертации составляет 118 страниц.

Во введении в соответствии с требованиями к содержанию и оформлению диссертационных работ, автор обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, указаны методы исследования, данные о достоверности и научной новизне результатов работы, положения, выносимые на защиту и сведения об апробации результатов диссертационного исследования. Также здесь дан обзор современных исследований по термомеханическому поведению композитов и по методам расчета напряженно-деформированного состояния пластин, подтверждающий необходимость разработки методики расчета пластин из высокотемпературных композитов, учитывающей физико-химические превращения в компонентах и уточняющей значения перемещений и напряжений за счет учета сдвиговых характеристик.

Первая глава посвящена моделированию свойств композиционных материалов с многостадийными фазовыми превращениями. Автор рассматривает композит как периодическую многоуровневую структуру и предлагает четырехуровневую модель для тканевого композита на неорганическом связующем. Первые два уровня выделены исходя из особенностей геометрической микроструктуры материала, третий и четвертый уровни, исходя из особенностей поведения данного класса материалов при высоких температурах, а именно: исходя из происходящих в матрице и волокнах физико-химических превращениях при различных температурах. Исходя из условий регулярного расположения компонент композита, автор рассматривает соответствующие ячейки периодичности композитного материала на разных структурных уровнях. Для моделирования физико-химических превращений в ячейках на третьем и четвертом уровне возникающие в результате этого фазы представляются в виде системы вложенных друг в друга геометрических кубов. Такое представление структуры фазовых переходов дает возможность поиска эффективных характеристик

для этих ячеек по принципу сложения слоев, который позволяет получить аналитические зависимости этих характеристик от температуры. Поскольку, в процессе нагрева в матрице происходит образование новых фаз, а именно: происходит химическая реакция по нескольким цепочкам, то автор учитывает относительные объемные концентрации каждой фазы в зависимости от времени и температуры прогрева. Для объемных концентраций выписана система дифференциальных уравнений, в которой массовые скорости фазовых превращений зависят по закону Аррениуса от энергии активации и температуры. В итоге, найденные относительные объемные концентрации дают возможность определить эффективные характеристики для четвертого уровня, а они уже являются исходными параметрами для расчетов на третьем уровне. Таким образом, расчет эффективных характеристик происходит последовательно: на более высоком структурном уровне используются данные полученные на предыдущем структурном уровне модели. Также в этой главе выписаны обобщенные законы Гука и Фурье, в которых присутствует зависимость тепловых и упругих характеристик от относительных объемных концентраций фаз, которые в свою очередь зависят от температуры.

Для расчета эффективных характеристик на первом и втором структурных уровнях автор использует метод асимптотического усреднения уравнений с быстроосциллирующими коэффициентами, разработанный в работах Бахвалова и Победри, а также формулирует локальные задачи, для решения которых применяется метод конечных элементов. Здесь также приводятся некоторые численные результаты для тканевого композиционного материала с керамическими волокнами.

Во второй главе описывается модифицированная теория расчета тонких многослойных пластин, основанная на асимптотическом анализе трехмерных уравнений термоупругости. Объектом исследования является тонкая пластина постоянной толщины из композиционного материала с высокотемпературными многостадийными фазовыми превращениями. Для такой пластины записывается система уравнений термоупругости в безразмерном виде, дополненная дифференциальными соотношениями для относительных объемных концентраций фаз. Для такой системы введены ограничения на число Фурье в процессе нагрева и условия для давления на верхней и нижней поверхностях пластины и для теплового потока, обеспечивающие применимость метода асимптотического усреднения. Малым

параметром здесь является отношение ширины пластины к ее характерному размеру, или, иными словами, соотношение между характерной скоростью физического процесса вдоль и поперек пластины. В процессе асимптотического анализа получена рекуррентная последовательность локальных задач термоупругости для композиционного материала с фазовыми превращениями (выписаны первые четыре приближения). Особое внимание уделено определению продольных и поперечных перемещений. Их рассмотрение ведется до второго и третьего порядка точности соответственно, что повышает точность расчета поперечных напряжений и напряжений межслойного сдвига.

В третьей главе автор получает аналитическое решение усредненной системы уравнений в задаче об изгибе и прогреве многослойной ортотропной пластины с фазовыми превращениями для двух случаев ее закрепления и при равномерном постоянном давлении на границе. Для такой модельной задачи автор демонстрирует сходимость полученного асимптотического решения к трехмерному решению, полученному конечно-элементным методом. Для асимптотического решения второго порядка точности продемонстрировано значительное расхождение с решением первого порядка точности, в котором перемещения соответствуют классической теории типа Кирхгофа-Лява. Из результатов расчета и сопоставления с аналитическим и конечно-элементным решением видно, что при полном соответствии напряжений величина прогиба по классической теории будет получаться заниженной, особенно для коротких пластин. Приведены подробные демонстрационные результаты в задаче об изгибе тонкой многослойной пластины с равномерным давлением и равномерно распределенным температурным полем. Дана температура в различные моменты времени, концентрация фаз композита в зависимости от времени прогрева, изменение температуры и концентраций фаз композита по толщине пластины в различные моменты времени, изменение модуля упругости матрицы, волокна композита, компонент тензора упругости композита в различные моменты времени в сечении пластины по отношению к начальному состоянию. Результаты подтверждают необходимость учета сдвиговых характеристик пластины, поскольку из-за фазовых превращений в материале могут появиться внутренние зоны упрочнения, что может приводить к увеличению сдвиговых напряжений.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и выводы.

Замечания по диссертационной работе:

1. В главе 1, в п. 1.5 предлагается структурная модель фазовых превращений в материале при нагреве в виде системы вложенных друг в друга геометрических кубов, что позволяет построить оценки эффективных характеристик при физико-химических превращениях на основе принципа сложения последовательных или параллельных слоев (модель Такаянаги, см. [Мэнсон Дж., Сперлинг Л. Полимерные смеси и композиты. М., Химия, 1979; с. 68]). Такой подход представляется здравым, однако, поскольку является идеализацией реально происходящих процессов, нуждается в подтверждении путем сравнения с данными реальных экспериментов. К сожалению, в диссертации таких сравнений не приводится.
2. В п. 1.5, стр. 21 допущен терминологический казус – применяется термин тепловое расширение вместо коэффициент теплового расширения. В остальных местах диссертации при этом применяется корректный термин.
3. В п. 1.8, стр. 28, – представляется сомнительным в случае слоистого материала применение в формуле (1.47) принципа смеси для коэффициента Пуассона ν_L . Следует отметить, для трансверсально-изотропного слоистого материала задача определения его эффективных характеристик методом асимптотического усреднения решается в аналитическом виде, и для всех коэффициентов Пуассона имеется точная аналитическая формула.
4. Для решения локальных задач L_{pq} (п. 1.16, стр. 40) применяется слишком “жесткий” конечный элемент – 4-х узловой тетраэдр, который может давать значительную погрешность аппроксимации. В настоящее время стандартом конечно-элементных расчетов является использование как минимум или 10-ти узлового тетраэдра, или 8-ми узлового гексаэдра, которые дают оптимальную аппроксимацию в КМ расчетах.

5. В п. 1.17, Рисунок 1.13, 1.16, 1.20, 1.21 – приводятся посчитанные значения относительных модулей упругости для композиционного материала на неорганической основе. Однако, не указано относительно какой величины нормируются эти характеристики. На рисунках 1.20, 1.21 относительный модуль упругости почему-то назван безразмерным модулем упругости, что весьма оригинально, поскольку неизвестно, что это такое.
6. В п. 1.18, стр. 52 – опечатка в определении тензора упругих податливостей Π_{ijkl} через модули Юнга и коэффициенты Пуассона. Первый столбец, третья строчка, вместо коэффициента ν_{13} должен стоять коэффициент Пуассона ν_{31} . Для ортотропного материала имеется шесть коэффициентов Пуассона, которые разбиваются на три пары и определяют парами один и тот же внедиагональный элемент тензора податливостей. Однако, их подмена в случае сильной ортотропии материала приводит к значительным искажениям тензора жесткости и, как следствие, к значительным ошибкам в расчетах.
7. В главе 2, п. 2.1 при постановке задачи линейной термоупругости для тонкой пластины производится обезразмеривание всех величин, входящих в постановку задачи (перемещения, плотность, модули упругости, напряжения, время прогрева, температура, тепловой поток, теплоемкость, теплопроводность). Однако, нигде ничего не сказано о значениях базовых величин, относительно которых вводятся безразмерные параметры задачи.
8. Кое-где встречаются досадные опечатки (“предствалено”, стр. 97; “защимлен”, стр. 106), но их количество незначительно и не приводит к недоразумениям.

Сделанные замечания не имеют принципиального значения и не снижают научной ценности работы. Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», посвящена актуальной теме и выполнена на высоком уровне. Полученные в работе результаты обладают новизной, представляют научный, практический и методический интерес, соответствуют

пунктам 4 и 5 паспорта специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела». Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что представленная диссертационная работа Еголевой Екатерины Сергеевны соответствует критериям п. 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Еголева Екатерина Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент

Волков-Богородский Дмитрий Борисович,

кандидат физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник

ФГБУН Институт прикладной механики

Российской академии наук (ИПРИМ РАН)

Адрес места работы:

125040, Россия, Москва, Ленинградский проспект, д. 7


E-mail: v-b1957@yandex.ru

Тел: +7 495 946-18-06

Специальность ВАК, по которой защищена

диссертация – 01.01.07 «Вычислительная

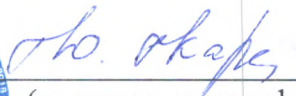
математика»


Д.Б. Волков-Богородский

Подпись Волкова-Богородского Д.Б. заверяю

Ученый секретарь ИПРИМ РАН
(должность)




Ю.Н.Карнет
(подпись, расшифровка)

26.10.2020