

Утверждаю

Заместитель генерального директора

АО «Композит», к. ф.-м. н.



А. Э. Дворецкий
18.10. 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации акционерного общества «Композит» на диссертацию 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 темы. В представленной диссертационной работе рассматриваются вопросы моделирования напряженно-деформированного состояния многослойных тонких пластин из высокотемпературных композиционных материалов с фазовыми превращениями. Тонкие многослойные конструкции, в том числе композитные, находят широкое применение при производстве изделий ракетно-космической и авиационной техники, строительстве, медицине и других отраслях промышленности. Проблема проектирования и создания конструкций, эксплуатирующийся в условиях одновременного воздействия высоких температур и внешних механических факторов, является актуальной задачей для современного машиностроения. Одной из причин потери прочности многослойных тонкостенных конструкций является появление дефектов типа расслоения, для корректного моделирования которых необходимо учитывать изгибные и сдвиговые напряжения, напряжения межслойного сдвига, а также многостадийные физико-химические превращения в

обеспечения МАИ
«9» 11 2020 1

каждом компоненте композита. Обычно для расчетов многослойных композиционных конструкций применяют либо специальные теории тонких пластин и оболочек либо прямые трехмерные теории. Проведение расчетов НДС тонких пластин с приемлемой точностью в общей трехмерной постановке для многослойных оболочечных конструкций сложной формы, как известно, требует больших затрат с точки зрения моделирования, а также мощных вычислительных ресурсов. Поэтому не пропадает интерес к проведению расчетов с использованием двумерных теорий и разработке модификаций уже известных в инженерном деле теорий пластин и оболочек, поскольку последние обычно используются в совокупности с системой дополнительных, часто математически необоснованных, предположений относительно распределения перемещений и напряжений по толщинной координате. В связи с этим применение для вывода уточненных теорий метода асимптотического осреднения, позволяющего проводить анализ асимптотического поведения полученных задач, представляется более корректным с математической точки зрения. Данный метод зарекомендовал себя при рассмотрении процессов в периодических средах, таких как конструкции из композиционных материалов. В представленной диссертационной работе предложен новый модифицированный вариант асимптотической теории расчета тонких пластин из высокотемпературных композиционных материалов с фазовыми превращениями. При этом, для учета фазовых превращений в материале, особое внимание было уделено иерархическому моделированию микроструктуры тканевого композита на неорганическом связующем при нагреве и построению определяющих соотношений для материалов данного класса.

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

- предложена новая математическая модель многоуровневой структуры тканевых композиционных материалов с многостадийными фазовыми превращениями в матрице и волокнах при высоких температурах, и построены определяющие соотношения для ортотропных высокотемпературных композитов

на основе этой модели, позволяющие производить расчет термоупругих характеристик композитов;

- применен новый подход, основанный на асимптотическом анализе исходной трехмерной системы уравнений теории термоупругости без дополнительных допущений о характере аналитической зависимости напряжений и перемещений по толщине пластины, позволяющий получить модифицированную теорию расчета тонких упругих пластин из высокотемпературных композитов с многостадийными фазовыми превращениями.

Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, основана на применении подтверждённых теоретических методов и физико-математических законов, и сравнении результатов с результатами, полученными с помощью прямого трехмерного конечно-элементного моделирования в промышленном программном комплексе и на основе других расчетных методов.

Практическая значимость диссертации состоит в представленном в ней новом подходе для моделирования напряженно-деформированного состояния многослойных тонких пластин из композиционных материалов с учетом в них физико-химических превращений. Подход основан на применении метода асимптотического осреднения для вывода двумерных систем уравнений термоупругости многослойной тонкой пластины и выражений для компонент тензоров напряжений. Построение определяющих соотношений для композитов на неорганическом связующем потребовало разработки новой математической многоуровневой модели композита с фазовыми превращениями, подкрепленной описанием изменения свойств на каждом уровне. Предложенная методика может быть использована как составная часть при расчетах различных деформационных процессов в тонких пластинах из композитов с фазовыми превращениями, и, вероятно, обладает относительно имеющихся аналогов рядом преимуществ с точки зрения математической обоснованности и вычислительных затрат.

Публикации и апробация работы. Основные положения 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 произведена на различных международных научных конференциях, а также на семинарах кафедры вычислительной математики и математической физики МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и заключения и списка литературы из 70 наименований, которые изложены на 118 страницах.

Во введении обосновывается актуальность темы, производится обзор состояния проблемы исследования, формулируются цель и задачи работы, указываются данные о достоверности результатов работы, научная новизна, положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложены принципы и методы моделирования свойств композитов с многостадийными фазовыми превращениями. Рассмотрена многоуровневая модель, предложенная для класса тканевых композиционных материалов с многостадийными фазовыми превращениями, которые реализуются, например, в композитах на неорганическом связующем. На первом уровне введена ячейка периодичности в виде структуры ткани с матрицей, на втором – волокно и матрица с известной геометрией ячейки. На третьем уровне автор выделяет двухфазное связующие, как комбинацию двух фаз, полученных от двух различных цепочек фазовых превращений, при этом отмечается, что геометрия ячейки периодичности на третьем уровне уже не известна, и автор использует модель кубических фаз. Каждая из фаз с третьего уровня представляется как пятифазная среда, в процессе нагрева объем самой ячейки остается неизменным, меняются только объемные концентрации фаз внутри ячейки. Для поиска эффективных свойств ячеек периодичности на третьем и четвертом уровнях автор предлагает использовать метод сложения слоев. Построены соотношения для

расчета эффективных моделей упругости и коэффициентов теплового расширения для ячеек с кубической формой фаз. Полученные эффективные свойства для ячеек на третьем уровне являются входными данными для поиска эффективных свойств на последующих иерархических уровнях. Для ячеек с заранее известной искусственной геометрией поиск эффективных характеристик ведется методом гомогенизации. Для моделирования армирующих нитей используется заимствованная модель со ссылкой на публикацию. В первой главе получены системы дифференциальных уравнений для поиска объемного содержания фаз в связующем и в волокне, уравнения обобщенного закона, описывающего связь напряжений и деформаций, а также обобщенного закона Фурье, при этом подчеркнута зависимость термоупругих характеристик от объемного содержания фаз. Приведены результаты численного моделирования тканевого композита с керамическими волокнами на связующем фосфатного типа в виде графиков распределений относительных объемных концентраций фаз и модулей упругости в зависимости от температуры нагрева для связующего и волокон, и композита в целом.

Во второй главе излагается модифицированная теория термоупругости тонких многослойных пластин с многостадийными фазовыми превращениями. Вводится малый параметр как отношение толщины пластины к характерному размеру всей пластины. Рассматривается система уравнений линейной теории термоупругости для пластины с температурно-зависящими свойствами с граничными условиями на поверхностях пластины и на границах раздела слоев. Система также включает уравнения, описывающие изменения фазового состава, благодаря которым можно найти зависимости термоупругих свойств от температуры и времени. Система дополняется предположениями относительно числа Фурье процесса нагрева, давления на верхней и нижней поверхностях пластины, а также полагается, что давление и тепловой поток мало меняются на расстояниях порядка толщины пластины. При описании свойств пластины по толщине пластины используется безразмерная локальная координата. Искомые функции ищутся в виде асимптотических разложений по малому параметру, в

итоге автор получает рекуррентную последовательность локальных задач термоупругости для пластины из композиционного материала с фазовыми превращениями. Для повышения точности предложенной теории, автор специальным образом рассматривает второе приближение для продольных перемещений и третье приближение для поперечного перемещения. В итоге получены осредненные уравнения равновесия пластин типа Тимошенко, но без введения допущений о характере неизвестных функций.

В третьей главе рассмотрены несколько модельных задач об изгибе тонкой прямоугольной пластины. Построено аналитическое решение задачи о прогибе многослойной пластины из композиционного материала при воздействии постоянного давления. Данное решение показывает наличие явной зависимости прогиба от модуля сдвига, что отличает его от решений, полученных при рассмотрении перемещений только до первого порядка. Демонстрация точности производится путем проведения тестовых расчетов для задачи о прогибе трехслойной пластины из ортотропного материала равномерным давлением и сравнения с эталонным прямым трехмерным решением, полученным с помощью программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS, а также с решением по так называемой асимптотической теории первого порядка точности. Сравнение проведено для двух пластин с разными параметрами. На графиках показано, что модифицированная теория расчета при полном соответствии напряжений трехмерному решению, уточняет прогиб и приближает его к прогибу трехмерного решения для «коротких» и «длинных» пластин.

Построено аналитическое решение для случая прогиба при воздействии равномерного давления и неравного нестационарного нагрева для композита с фазовыми превращениями, которые реализуются, например, в некоторых типах композитов на неорганических связующих. Результаты проиллюстрированы графическими распределениями температуры, фазовых концентраций, относительных модулей упругости, напряжений по толщине пластины и для различных моментов времени. Приведено изменение прогиба по длине пластины

для двух различных вариантов закрепления концов пластины в 4 различных момента времени. Приведенные результаты демонстрируют эффект влияния фазовых превращений на НДС пластины, а также эффект упрочнения материала в процессе нагрева, сопровождающийся повышением уровня изгибных напряжений.

В заключении подводятся итог работы. Отмечаются основные результаты.

Замечания по диссертационной работе:

1. Разработанная модель содержит большое количество констант, методика определения которых, в явном виде в работе не отражена. Вопрос о корректном определении констант в моделях такого класса представляет собой достаточно сложную задачу, требующую пояснений.

2. В работе не представлены принципы выбора количества фаз и числа фазовых превращений, поэтому остается неясным ограничены ли эти параметры физическими, или иными соображениями.

3. В модели, разработанной в работе, не учитываются фазовые превращения, приводящие к изменению плотности материала.

Сделанные замечания не имеют принципиального значения для оценки диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченное исследование, посвященное решению актуальной проблемы.

Автореферат достаточно правильно и полно отражает содержание диссертации.

В целом, работу следует оценить положительно. Диссертационная работа Еголевой Екатерины Сергеевны соответствует всем критериям «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».

Настоящий отзыв рассмотрен и утвержден подсекцией научно-технического совета комплекса «Неметаллические материалы» АО «Композит» протокол № 10-16-20 расширенного заседания подсекции научно-технического совета от 16 октября 2020 г.

Начальник отделения 0110, д. т. н.



Логачева А.И.

Начальник отделения 0220, к. т. н.



Тащилов С.В.

Начальник отдела 0222, к. ф.-м. н.



Вагин В.П.

Адрес: 141070, Московская область, г. Королёв, Пионерская ул., д. 4

Тел.: +7 (495) 513-20-28, +7 (495) 513-23-29, факс: +7 (495) 516-06-17

e-mail: info@kompozit-mv.ru