

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Корниевского Александра Сергеевича

«Моделирование и определение эффективных свойств пористых анизотропных упругих материалов с учетом внутренней структуры и поверхностных напряжений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Создание математических моделей многофазных пористых композиционных материалов, обладающих анизотропией и сложными законами взаимодействия фаз, имеет обширные приложения результатов исследований в высокотехнологичном машиностроении. При этом возникают возможности определять эффективные механические свойства композитов с уникальными свойствами, прогнозировать их поведение при различных режимах эксплуатации. Несмотря на ряд научно-исследовательских работ, как в России, так и за рубежом, посвященных изучению наноразмерных пористых материалов к настоящему времени существуют не исследованные и малоизученные задачи, как, например, гомогенизация высокопористых анизотропных композитов с учетом поверхностных напряжений Гуртина-Мурдоха, идентификация эффективных модулей жесткости для композитов с произвольным типом анизотропии и связанные с ними проблемы разработки эффективных алгоритмов генерации геометрической структуры таких материалов. Все вышесказанное определяет **актуальность и научно-практическую значимость** темы диссертационного исследования Корниевского Александра Сергеевича: «Моделирование и определение эффективных свойств пористых анизотропных упругих материалов с учетом внутренней структуры и поверхностных напряжений», что также подтверждается и тем, что основные результаты диссертации были получены в рамках многочисленных грантов, при поддержке которых выполнено данное диссертационное исследование, а именно, РНФ, РФФИ, госзадания Минобрнауки, Правительства РФ.

В диссертации Корниевского А.С. разработаны новые модели гомогенизации высокопористых анизотропных композитов с учетом поверхностных или интерфейсных напряжений, удовлетворяющих соотношению Хилла, модели нанопористых композитов в рамках модели Гуртина-Мурдоха, предложены новые эффективные алгоритмы генерации регулярной и нерегулярной внутренней структуры многофазных сред, алгоритмы идентификации эффективных модулей жесткости для композитов с произвольным типом анизотропии.

Объем диссертации – 120 страниц. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемых источников, приложения.

Во введении обоснована актуальность исследования и его новизна, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования. Освещена теоретическая и практическая ценность результатов диссертационной работы и их достоверность, представлена информация об апробации работы, публикациях и личном вкладе соискателя.

В первой главе дан обзор современного состояния проблемы, анализ полученных ранее результатов и подходов к исследованию сходных задач. Приводятся описания видов рассматриваемых композитов и пористых материалов в макро- и наномасштабах, их характеристики и свойства. Дана постановка задачи теории упругости с поверхностными и интерфейсными напряжениями для анизотропных неоднородных тел, описан переход к слабым или обобщенным постановкам, которые применяются далее для конечно-элементных аппроксимаций. Представлены матрицы жесткости при учете поверхностных эффектов, возникающих на границах раздела фаз.

Вторая глава содержит описание алгоритмов и методов генерации представительных объемов. Рассматривается моделирование композитов с открытой пористостью при случайном законе расположения пор. Построены новые компьютерные модели с использованием структур, составленных из ячеек Гибсона-Эшби с расширенными свойствами, размеры внутренних кубических каркасов которых выбираются случайным образом. Рассмотрены различные варианты конфигураций ячейки и методы построения нерегулярных решеток из таких ячеек. Описан процесс разбиения модели конечными элементами, исследована сходимости модели и ее корректность. Разработан комплекс программ на языке APDL ANSYS, позволяющих

строить представительные объемы со случайной структурой пористости, со связностью обеих фаз по алгоритмам пакета ACELAN-COMPOS, созданном на кафедре математического моделирования Южного федерального университета, решать численно задачи гомогенизации и определять полный набор эффективных модулей жесткости для материалов произвольного типа анизотропии.

В третьей главе описаны вычислительные эксперименты по определению эффективных модулей пористых изотропных и анизотропных упругих материалов с интерфейсными напряжениями для базовой ячейки Гибсона-Эшби и для регулярных и нерегулярных решеток, составленных из таких ячеек. Численные результаты сравнивались с аналитическими. При выборе для нерегулярных решеток размеров ячеек случайным образом коэффициенты матрицы эффективных упругих модулей усреднялись с использованием статистических методов с вычислением доверительных интервалов. Кроме этого, исследовано влияние геометрии внутреннего каркаса при фиксированной пористости. Важным результатом данного численного эксперимента является заключение, что эффективные модули упругости зависят не только от пористости, как в формуле Гибсона-Эшби, но и от геометрической конфигурации самой ячейки. Отмечено, что для нерегулярных решеток характерно появление геометрической анизотропии эффективных свойств композита. Численные эксперименты показали, что поверхностные напряжения имеют большее влияние на эффективные свойства пористого композита, чем геометрическая конфигурация ячеек.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В приложении представлен программный код, используемый для решения задач гомогенизации для ячейки Гибсона-Эшби при учете поверхностных напряжений.

Диссертация грамотно оформлена, хорошо структурирована.

По диссертационной работе Корниевского Александра Сергеевича имеются следующие **замечания и рекомендации**:

1. Было бы интересно привести в работе результаты лабораторных экспериментов по определению механических свойств конкретного высокопористого материала.

2. В диссертации при изложении возможностей алгоритмов, созданных для численного анализа программ, не уделено достаточное внимание их временной эффективности.
3. Могут ли быть распространены на многофазные композиции предложенные алгоритмы гомогенизации анизотропных пористых двухфазных материалов при учете поверхностных напряжений?
4. Предложенный подход (глава 1) может быть применен и для определения эффективных свойств двухфазных материалов с включениями ненулевой жесткости. Интерес представляет вопрос наследования типа упругой симметрии гомогенным материалом в случае различных типов симметрии материалов фаз при учете геометрии ячейки.

Сделанные замечания не умаляют ценности диссертации и не влияют на положительную оценку представленных в работе исследований.

Достоверность исследований основывается на корректном использовании классических методов гомогенизации композитов в совокупности с методом конечных-элементов. Моделирование поверхностных эффектов было основано на теории Гуртина-Мурдоха, а в качестве высокопористой структуры была взята модель, базирующаяся на ячейке Гибсона-Эшби, которые подтверждены экспериментально. Кроме того, все предложенные в данной работе модели сравнивались с известными частными случаями. **Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций диссертации** не вызывает сомнений.

Научные результаты, полученные соискателем, являются **оригинальными и обоснованными**. Разработаны модели гомогенизации пористых анизотропных упругих композитов с учетом интерфейсных напряжений, разработаны конечно-элементные модели нанокомпозитов, учитывающие поверхностные напряжения Гуртина-Мурдоха, разработаны алгоритмы для расчета полного набора эффективных модулей жесткости для композитов с произвольными типами как физической, так и геометрической анизотропии при регулярных и нерегулярных решетках, составленных из ячеек Гибсона-Эшби. Разработаны специализированные программы для APDL ANSYS для вычисления в ANSYS эффективных модулей пористых упругих композитов с учетом интерфейсных напряжений. Проведен

обширный численный эксперимент, **доказывающий** эффективность реализованных математических моделей.

Результаты диссертационной работы получили широкую **апробацию** на международных и российских конференциях. По теме диссертации представлена 31 публикация, из них 3 статьи опубликованы в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ЮФУ по специальности 1.2.2 или в наукометрические базы Scopus и Web of Science, 7 статей – в прочих изданиях, индексируемых в Web of Science или в Scopus.

Практическая значимость диссертации состоит в возможности использования разработанных методов при создании и прогнозировании механических свойств пористых композитов с различной микроструктурой.

Научная значимость заявляемых результатов связана с комплексным развитием методов моделирования, конечно-элементных технологий и программного инструментария для определения эффективных свойств пористых и высокопористых композитов с усложненными механическими свойствами, такими как поверхностные напряжения и анизотропия. Разработанные программы и инструменты позволяют упростить и удешевить процесс создания материалов с наиболее подходящей структурой для определенных целей.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание работы и отвечает всем предъявляемым требованиям.

Заключение. Диссертационная работа Корниевского Александра Сергеевича «Моделирование и определение эффективных свойств пористых анизотропных упругих материалов с учетом внутренней структуры и поверхностных напряжений», выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-исследовательской работой. В ней разработаны новые подходы математического моделирования пористых материалов, снабженных микроструктурой с учетом интерфейсных напряжений, численные методы решения задач и алгоритмы реализации по определению эффективных характеристик таких материалов. Результаты диссертации актуальны и востребованы для теории и практики.

Диссертационная работа «Моделирование и определение эффективных свойств пористых анизотропных упругих материалов с учетом внутренней структуры и поверхностных напряжений» отвечает паспорту научной

специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки) и всем основным требованиям Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Корниевский Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

« 24 » ноября 2023 г.

Согласна на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного Совета и их дальнейшую обработку

Официальный оппонент



Беляк Ольга Александровна
доктор физико-математических наук

(специальность 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела»),

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,

профессор кафедры «Теоретическая механика», доцент,

телефон: +8 863 2726349,

e-mail: o_bels@mail.ru,

адрес: 344038, г. Ростов-на-Дону,

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2

Подпись

Белек О. А.

УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник управления делами
ФГБОУ ВО РГУПС

« 24 »

11



Т.М. Канина