

ОТЗЫВ

официального оппонента Кучумова Алексея Геннадьевича
на диссертационную работу Герасимова Олега Владимировича
«Моделирование деформирования образцов из негетомогенных материалов по данным
компьютерной томографии», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твёрдого тела»

Актуальность работы

Построение численных моделей исследуемых образцов выступает в качестве одного из актуальных направлений в механике деформируемого твёрдого тела. Активное развитие современных подходов к созданию негетомогенных материалов и изготовлению из них сложных конструкций обуславливает недостаточную разработанность существующих методик для определения механических свойств образцов и приводит к необходимости в большой мощности вычислительных устройств. В этом случае проведение натурных экспериментов не позволяет в достаточной мере решать задачу, так как представляет собой трудоёмкий и дорогостоящий процесс. Таким образом, в настоящее время большое распространение получили подходы, основанные на совместном применении численных методов и методов неразрушающего контроля. В этом случае реализация численного моделирования основывается на использовании данных с изображений исходной области, позволяющих получить распределение значений проницаемости среды в заданном объёме. Преимуществом таких подходов выступает возможность проведения множественных вычислений без необходимости в разрушении исходных образцов: восстановление расчётной геометрии и учёт пространственного распределения механических свойств материала выполняется на основе цифрового двойника объекта. Применение методов неразрушающего контроля в расчётах получило распространение при исследовании анизотропных материалов сложной структуры, позволяя проводить вычисления как над образцами из композиционных материалов, так и над объектами биологического происхождения. Таким образом, разработка методов численного моделирования по данным цифрового двойника оказывается востребованным направлением при исследовании механических свойств материалов с уникальной структурой и геометрией.

В диссертационной работе предложен новый метод расчёта образцов из негетомогенных материалов, позволяющий проводить гомогенизацию выделенной области. Подход основан на методе конечных элементов и предполагает численное моделирование с учётом данных цифрового двойника. Построение отдельного конечного элемента сетки выполняется на основе интегрирования локальной матрицы жёсткости с весовой функцией, соответствующей обработанным данным с изображения расчётной среды. Восстановление таких изображений может быть выполнено проведением рентгеновской компьютерной томографии; полученные значения могут быть интерпретированы согласно количественной шкале рентгеновской плотности Хаунсфилда и пересчитаны в механические параметры материала. Применение предложенного в диссертации метода к расчёту образцов из негетомогенных материалов позволяет проводить вычисления с учётом сложной внутренней структуры на основе конечно-элементных сеток, восстановленных согласно данным о распределении плотности материала.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы может быть выражена в следующих положениях:

Отдел документационного
обеспечения МАИ

16. 09 2024 г.

1. Разработан и реализован новый метод расчёта образцов из негомогенных материалов по данным компьютерной томографии, позволяющий определять напряжённо-деформированное состояние в условиях воздействия внешних нагрузок.
2. Сформулированы основные математические соотношения, позволяющие проводить расчёт методом конечных элементов на основе взвешенного интегрирования локальной матрицы жёсткости.
3. Реализована новая методика построения расчётной геометрии, основанная на учёте пространственного распределения плотности материала.
4. Построен алгоритм и выполнена его программная реализация для расчёта образцов из негомогенных материалов по данным компьютерной томографии.
5. Представлены новые результаты решения задач вычислительной механики деформируемого твёрдого тела, основанные на применении данных с изображений расчётных образцов.
6. Разработана и реализована методика определения упругих констант негомогенных материалов, предполагающая проведение вычислительных и натуральных испытаний.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обуславливается корректностью математической постановки задачи теории упругости, использованием строгих математических методов, сопоставлением результатов с существующими работами других авторов, а также с данными натуральных экспериментов.

Практическая значимость

Практическая значимость результатов диссертации может быть выражена в следующем:

1. Построенный метод позволяет проводить статический расчёт и определять напряжённо-деформированное состояние образцов из негомогенных материалов, подверженных влиянию внешних нагрузок. Подход может быть применён для расчёта композитных образцов и объектов биологического происхождения.
2. Разработанный подход к восстановлению расчётной геометрии образцов на основе пространственного распределения проницаемости среды позволяет в полуавтоматическом режиме проводить дискретизацию области сканирования и выполнять аппроксимацию геометрии с заданной точностью. Метод позволяет восстанавливать геометрию образцов сложной структуры согласно данным с изображений, что может быть использовано при расчёте костных органов в медицинской практике.
3. Реализованная методика восстановления упругих констант негомогенных материалов на основе проведения вычислительных и натуральных экспериментов применима к образцам неоднородной структуры для определения механических параметров образующей ткани.

Апробация диссертационной работы

Диссертация Герасимова Олега Владимировича опубликована и апробирована в достаточной мере. Основные положения работы представлены в четырёх рецензируемых научных журналах, индексируемых международными базами цитирования, в том числе рекомендованных ВАК для публикации по направлению механика деформируемого твёрдого тела. Положения исследования докладывались на семнадцати международных и пяти всероссийских конференциях и семинарах по профилю механики деформируемого твёрдого тела.

Содержание и оформление диссертационной работы

Во **введении** обозначается актуальность исследований, проведённых в диссертационной работе, ставится цель и формулируются задачи, излагается научная новизна и теоретическая и практическая значимость, раскрывается методология и методы исследования, перечисляются положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность полученных результатов, подтверждается апробация работы, приводятся основные публикации по теме диссертации, определяется личный вклад автора.

Первая глава раскрывает современное состояние исследований в области моделирования негомогенных материалов. Приводится обзор научной литературы, направленный на изучение методов неразрушающего контроля и их применение в численных расчётах по данным с изображений; рассматриваются случаи практического применения цифровых двойников при оценке механических свойств образцов из негомогенных материалов. В первой главе подчёркивается отсутствие разработанных методов определения механических параметров негомогенных материалов, что обозначает новизну исследований в данной области и предполагает перспективу их дальнейшего развития. Также в главе описываются подходы к восстановлению изображений исследуемой среды, приводятся их преимущества и недостатки. Автор приходит к заключению, что наиболее предпочтительным методом для проведения исследований оказывается проведение рентгеновской компьютерной томографии с последующей обработкой полученного массива значений путём сегментации среды на несколько фаз материала. Отдельно выделены научные работы, направленные на описание методов гомогенизации среды согласно пространственному распределению механических свойств материала, обозначены трудности, связанные с реализацией методов и предложен новый подход, основанный на численном моделировании методом конечных элементов с учётом данных компьютерной томографии образца.

Вторая глава описывает методику построения цифрового двойника на основе данных с изображений: приводится метод интерпретации данных с исходных изображений области согласно шкале Хаунсфилда, приводятся эмпирические соотношения и описывается подход к сегментации данных, позволяющий выделять несколько фаз материала с усреднёнными механическими параметрами. Следующим этапом выступает формулировка основных математических соотношений для численного моделирования по данным с изображений: описывается метод конечных элементов, вводится в рассмотрение весовая функция, определяющая неравномерное распределение механических свойств материала в объёме, реализуется применение данных с изображений при построении численной модели. Предполагается, что материал является кусочно-однородным с выделением двух фаз среды, определяемых предварительной бинаризацией исходного массива значений. Также во второй главе описывается метод восстановления расчётной геометрии образцов, основанный на удалении из исходной регулярной ортогональной сетки конечных элементов с низким относительным содержанием упругого вещества. Автор диссертации отмечает, что определение расчётной области таким образом позволяет избежать трудностей, связанных с аппроксимацией геометрии сложной топологической структуры. В главе приводятся соотношения, позволяющие выполнять постпроцессорный анализ результатов расчёта, предполагающий локальное усреднение напряжённо-деформированного состояния с учётом данных о пространственном распределении механических свойств материала. Отдельно рассматривается применимость метода взвешенного интегрирования при расчёте образцов из негомогенных материалов. Заключительным разделом второй главы выступает описание методики восстановления упругих свойств материала на основе проведения вычислительных и натурных экспериментов.

В **третьей главе** выполняется постановка задачи механики деформируемого твёрдого тела, описывается реализация метода учёта неоднородных свойств материала для двухфазных сред,

приводятся технические особенности программной реализации алгоритма. В главе исследуется сходимость метода интегрирования, включающая изучение влияния размера исходного изображения и геометрии расчётной области. Далее рассматривается сходимость конечно-элементного ансамбля и метода прямого учёта анизотропных свойств, предполагающего построение изображений с заданной структурой материала для осуществления вычислительных экспериментов. Следующий раздел содержит результаты расчётов на модельных образцах, предполагающих проведение рентгеновской компьютерной томографии: в задачах рассматривалось два способа построения расчётных сеток, а также приводились результаты постановки натуральных испытаний. В качестве физических образцов использовались кости конечностей лабораторных крыс и карликовых свиней, обладающие сложной неомогенной пористой структурой. Валидация результатов численного моделирования по данным компьютерной томографии выполнялась на основе сопоставления с данными натуральных экспериментов, применяемых в дальнейшем для оценки упругих свойств материала. Последующий анализ полученных значений проводился путём постановки серии вычислительных экспериментов на образцах экспериментальной группы идентичных лабораторных испытаний. Представленный метод расчёта образцов из неомогенных материалов по данным с изображений показал достоверную сходимость значений с результатами проведения натуральных экспериментов.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в научных публикациях автора. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Основные результаты

Основные результаты диссертации опубликованы в 25 работах, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 — в периодических научных журналах, индексируемых *Web of Science* и *Scopus*, 4 — в библиографической базе данных научных публикаций *Russian Science Citation Index* и 20 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 4 программы для ЭВМ.

Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы

Содержание диссертационной работы предполагает наличие следующих замечаний:

1. В диссертационной работе автором не описывается механизм деформирования пористой среды внутри объёма отдельного конечного элемента при наличии взаимодействия микроэлементов материала. Каким образом численное моделирование представленным методом позволяет учитывать изменение упругих свойств материала при уменьшении пористости образца?
2. В работе отображается сходимость времени вычислений согласно параметрам расчётных моделей, однако отсутствует сопоставительный анализ скорости работы реализованной программы относительно существующих аналогичных подходов. Таким образом, остаётся открытым вопрос, что потребует большей вычислительной производительности: аппроксимация каждого микроэлемента среды отдельным конечным элементом или интегрирование с весовым множителем на основе представленного подхода?
3. В главе «2.2.4 Обоснование применимости метода взвешенного интегрирования» автор отмечает, что «допустимость взвешенного интегрирования основана на предположении о непрерывности функций форм и, как следствие, поля напряжённо-деформированного состояния», что не всегда оказывается верным, так как в случае использования линейных функций форм непрерывность при переходе межэлементных границ сохраняется только для поля перемещений, а их производные меняются скачком.

4. В диссертационной работе проводилось моделирование пористых образцов, однако неоднородность может быть также вызвана образованием различного рода трещин. Позволяет ли построение численной модели представленным методом учитывать начальные дефекты подобного происхождения?
5. Позволяет ли численная модель проводить оценку упругих характеристик многофазного материала (более двух фаз)?

Высказанные замечания не ставят под сомнение результаты диссертации, выносимые на защиту.

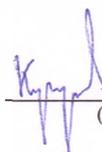
Заключение

Диссертационная работа Герасимова Олега Владимировича «Моделирование деформирования образцов из негомогенных материалов по данным компьютерной томографии» является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, которая по актуальности, научному уровню и практической значимости полученных результатов соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, установленным в Постановлении Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения учёных степеней». Считаю, что автор диссертационной работы Герасимов Олег Владимирович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твёрдого тела».

Официальный оппонент:

Кучумов Алексей Геннадьевич

доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией биожидкостей,
профессор кафедры вычислительной
математики, механики и биомеханики
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет»



/ А.Г. Кучумов

(подпись)

(Ф.И.О. оппонента)

Адрес места работы:

614990, Россия, Пермский край, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д. 29

kuchymov@inbox.ru, +7 (902) 808-63-27



Подпись

ЗАБЕЯЮ

Общественный секретарь
научного совета ПНИПУ

В.И. Макаревич

04 сентября 2024 г.

С отзвовой ознакомлен.

16.09.2024

