

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Еленской Наталии Витальевны

«Моделирование структуры решетчатых скаффолдов с учетом их механического отклика и вариации морфометрических параметров»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

В настоящее время тема разработки передовых имплантируемых систем для медицинского применения в ортопедии переживает взрывной всплеск внимания отечественных и зарубежных исследователей, обусловленный развитием высокотехнологичных подходов к созданию таких изделий, таких как аддитивные технологии. Эти технологии позволяют печатать сложные, иерархически структурированные изделия из широкого спектра различных биосовместимых материалов и прототипировать любые геометрические конфигурации, в том числе с проникающей пористостью с заданной топологией внутренней поверхности. Такие изделия не только могут воспроизводить структуру и заданную форму биологических объектов, но и характеризоваться механическим поведением, которое задаётся параметрами пор и может соответствовать костной ткани. Более того, наличие пор может обеспечивать возможность насыщения имплантата лекарственными препаратами, наделяя его биоактивными свойствами. Данная область исследований имеет ярко выраженный междисциплинарный характер и может быть успешно освоена при объединении усилий специалистов в области материаловедения, механики, компьютерных и информационных технологий, физики, химии, биологии, медицины и т.д. В частности, большую важность имеет вопрос о целенаправленном проектировании пористых структур, что представляет собой сложную многофакторную задачу. С этой точки зрения, тема диссертации, которая посвящена разработке модельных подходов для гибкого и эффективного проектирования пористых скаффолдов с контролируемым механическим поведением для медицинского применения, представляется **актуальной** и важной.

Краткая характеристика основного содержания работы

Во введении приведено обоснование актуальности работы, описана степень разработанности темы, охарактеризована новизна и значимость работы, сформулированы объект, предмет, цель и задачи диссертационного исследования.

Первая глава представляет аналитический обзор литературы по современному состоянию исследований в области проектирования решётчатых структур с точки зрения разработки имплантатов для ортопедии. Приводятся данные о строении и свойствах костной ткани, особенностях аддитивного производства изделий из биосовместимых материалов, различных моделях для воспроизведения пористых структур костной ткани.

Во второй главе приведен обзор подходов к проектированию решётчатых структур и способов задания топологии их элементарных ячеек на основе использования, обоснован выбор модели трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП) как базы для проектирования пористых скаффолдов, разработаны соответствующие модели, проведен их морфометрический анализ.

В третьей главе численно изучается эффект параметров ТПМП на механическое поведение спроектированных образцов из полилактида методом конечных элементов. Получены распределения эквивалентных напряжений по объему образцов, проведено сопоставление поведения спроектированных скаффолдов с референтной моделью костной ткани.

В четвертой главе проведено исследование гибридных ТПМП структур, а также выполнена валидация численных расчётов посредством проведения механических испытаний на сжатие экспериментально полученных образцов, в том числе при помощи метода цифровой корреляции изображений. Показано хорошее соответствие расчётных и опытных данных.

Достоверность результатов и обоснованность научных положений, а также основных выводов, сформулированных в диссертационной работе, не вызывает сомнений. Научные результаты получены соискателем при помощи численных расчётов на основе зарекомендовавших себя программных решений с последующей валидацией опытным путём. Основные положения работы прошли серьёзную внешнюю экспертизу в рецензируемых научных изданиях, в том числе высокорейтинговых. Это свидетельствует и о новизне полученных результатов, которая заключается в разработке новых алгоритмов гибкого проектирования моделей для периодических и функционально-градиентных решётчатых структур с различными параметрами, обеспечивающими контроль механического поведения изготовленных из них аддитивными методами изделий. Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные автором решения по проектированию и виртуальному испытанию разнообразных ТПМП структур являются универсальными и могут быть полезными широкому кругу исследователей, занимающихся разработкой, испытаниями и внедрением передовых биоактивных скаффолдов нового поколения из различных типов биоматериалов для использования в ортопедии.

В то же время, к работе имеется ряд замечаний:

1) Заявленной целью работы является «разработка новых математических моделей для рационального проектирования...». В то же время, в выводах по главам и в целом по диссертации упоминается «разработка методологии», «методики», «подхода» и др. В диссертации в явном виде не сформулировано, какие конкретно новые математические модели были разработаны в соответствии с определениями этого термина и чем они отличаются от существующих решений.

2) Автор заявляет, что в работе выполнен анализ механических характеристик различным образом спроектированных решётчатых структур.

Однако, представленные результаты относятся к данным по модулю упругости, который является важным, но не единственным механическим параметром. Такие важные для применения механические свойства как прочностные и усталостные не обсуждаются и не определяются в работе. Обсуждение доли элементов, напряжение в которых превышает предел текучести (стр. 92-93) не позволяет судить о пределе текучести всего образца. В то же время автор указывает интервалы значений этого параметра, характерного для костной ткани (стр. 28), но не указывает, укладываются ли в них величина спроектированных пористых структур. Есть опасение, что предел текучести этих изделий может оказаться ниже требований, предъявляемых к материалу для разработки биodeградируемых скаффолдов.

3) Что касается упругих свойств, то в той же табл. 1.6.1. указаны интервалы значений модуля упругости для разных видов костной ткани, лежащих в пределах 1–17 и 4–20 ГПа для трабекулярной и кортикальной ткани, соответственно. В то же время значения модулей упругости у пористых структур заметно ниже наименьшего порога для костной ткани и составляет ~0.4 МПа и ниже (см. табл. 4.5.2.). В связи с этим возникает вопрос, насколько в работе решена поднятая проблема соответствия механических характеристик напечатанных пористых структур и костной ткани, тем более, для участка на границе тканей разных типов.

4) Автор упоминает, что важной особенностью выбранного материала исследований является его способность к деградации в среде человеческого организма. В то же время эволюция свойств разрабатываемых конструкций по мере растворения материала не учитывается в представленной работе и подробно не обсуждается.

5) Автор упоминает, что костная ткань проявляет выраженную анизотропию свойств, также известно, что анизотропию свойств может проявлять и напечатанный материал. Эти эффекты не рассматриваются и не анализируются с точки зрения соответствия свойств разрабатываемых изделий и замещаемых участков костей.

6) Несмотря на то, что в целом работа написана аккуратно и в ясном научном стиле, есть ряд неточностей в терминах («верификация» вместо «валидация» и т.д.), не указаны все единицы измерения в табл. 3.1.1., встречаются несогласования в словах (см, например, первое предложение на стр. 11 автореферата).

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации Еленской Н.В. и не ставят под сомнение квалификацию диссертанта, а также основные выводы и положения, выносимые на защиту. Работа «Моделирование структуры решетчатых скаффолдов с учетом их механического отклика и вариации морфометрических параметров» является завершённым исследованием, выполненном на высоком научном уровне.

Диссертационная работа Н.В. Еленской «Моделирование структуры решетчатых скаффолдов с учетом их механического отклика и вариации морфометрических параметров» соответствует паспорту специальности 1.2.2.

«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях», профессор кафедры Материаловедения и физики металлов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»,

доктор физико-математических наук по специальностям 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела и 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Я, Еникеев Нариман Айратович, даю своё согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Еленской Наталии Витальевны, и их дальнейшую обработку.

Адрес организации: 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

Телефон: +7 (347) 229-96-16

E-mail: nariman.enikeev@uust.ru

Еникеев Нариман Айратович

25.11. 2024 г.

