

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19
по диссертации Еленской Наталии Витальевны
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**

Диссертация «Моделирование структуры скаффолдов с учетом их механического отклика и вариации морфометрических параметров» по научной специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите «11» октября 2024 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом Д ПНИПУ.01.19, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от «06» апреля 2022 г. № 35-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым - четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. N 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. N 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре «Динамика и прочность машин» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГАОУ ВО ПНИПУ) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Ташкинов Михаил Анатольевич, доцент кафедры «Динамика и прочность машин» ФГАОУ ВО ПНИПУ

Официальные оппоненты:

1. Маслов Леонид Борисович, доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»;

2. Еникеев Нариман Айратович, доктор физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, 01.04.07 – Физика конденсированного состояния), 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».

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией, соответствием области научных интересов и направлений исследований тематике

диссертационной работы, а также наличием публикаций в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях, соответствующих специальности 1.2.2.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», город Калининград (отзыв ведущей организации утвержден и.о. ректора Деминым Максимом Викторовичем, кандидатом физико-математических наук, заслушан на заседании ученого совета образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» (протокол заседания № 19 от 05.11.2024) и подписан руководителем ОНК «Институт высоких технологий» Юровым Артемом Валериановичем, доктором физико-математических наук, профессором).

Выбор ведущей организации обосновывается научной деятельностью сотрудников организации, связанной с тематикой диссертации и уровнем компетенций, позволяющих оценить значимость полученных в рамках диссертационного исследования результатов для развития отрасли физико-математических наук.

По теме диссертации соискателем опубликовано **37** научных трудов, в том числе **8** работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени, из них **8** работ – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science Core Collection и Scopus, соискателем получено **6** свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Elenskaya N. Modeling of Deformation Behavior of Gyroid and I-WP Polymer Lattice Structures with a Porosity Gradient / N. Elenskaya, M. Tashkinov // Procedia Structural Integrity. — 2021. — № 32. — С. 253–260. Web of Science, Scopus (Авторский вклад соискателя 70%).

Статья посвящена функционально-градиентным решетчатым структурам, созданным на основе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП) гироидного и I-WP типов. Результаты моделирования механического поведения решетчатых структур при одноосном растяжении получены с помощью конечно-элементного анализа. Влияние структурных параметров и свойств градиента на распределение полей напряжений изучалось путем сравнения кривых нагружения, полученных для структур в ходе численного моделирования. Соискателем приведены результаты разработки математических моделей структур на основе ТПМП с функциональным градиентом пористости, результаты исследования их упругопластического поведения.

2. Elenskaya N. Numerical simulation of deformation behavior of additively manufactured polymer lattice structures with a porosity gradient / N. Elenskaya, M. Tashkinov //

Procedia Structural Integrity. — 2022. — № 37. — С. 692-697. Web of Science, Scopus (Авторский вклад соискателя 70%).

В статье представлены результаты численного моделирования деформационного поведения гироидных градиентных структур при различных видах нагружения. Исследовано влияние структурных параметров и свойств градиента на механическое поведение. Соискателем приведены результаты разработки математических моделей для описания упругопластического поведения функционально-градиентных структур на основе ТПМП.

3. Еленская Н. В. Численное поведение деформационного поведения полимерных решетчатых структур с градиентом пористости, изготовленных на основе аддитивных технологий / Н. В. Еленская, М. А. Ташкинов, В. В. Зильбершмидт // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2022. – Т. 9 (67). – № 4. – С. 679–692. Scopus, Q4, ВАК (Авторский вклад соискателя 70%).

В статье представлены результаты исследования механического поведения периодических и функционально-градиентных структур на основе ТПМП в условиях свободного сжатия, а также проведена оценка влияния параметров структуры и градиента на механический отклик. Соискателем приведены результаты разработки математических моделей периодических и функционально-градиентных структур с контролируемыми геометрическими параметрами. Также представлены результаты проведенной численной оценки их механического отклика под воздействием сжимающих нагрузок. Описаны данные о влиянии геометрических параметров структуры на её механический отклик, полученные за счет сопоставления результатов моделирования с применением методов статистического анализа.

4. Understanding of trabecular-cortical transition zone: Numerical and experimental assessment of multi-morphology scaffolds / N. Elenskaya, M. Tashkinov, I. Vindokurov [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2023. – Т. 147. – С. 106146. Web of Science, Scopus, Q2 (Авторский вклад соискателя 65%).

В статье представлены результаты проектирования структур скаффолдов с градиентами пористости и морфологического строения на основе ТПМП. Было проанализировано влияние параметров градиента и выбора базовой ТПМП на распределение напряжений в скаффолдах. Представлены результаты сопоставления полученных данных с результатами экспериментальных исследований. Соискателем сформулирован подход к использованию градиентных структур на основе ТПМП для замещения переходной зоны между кортикальной и трабекулярной костной тканью, приведены результаты проектирования функционально-градиентных структур с контролируемыми параметрами градиента. Приведены результаты оценки упругопластического поведения разработанных структур при сжатии.

5. Elenskaya N. Numerical strategies for modelling of the degradation process in TPMS-based polymer scaffolds / N. Elenskaya, P. Koryagina, M. Tashkinov, V. Silberschmidt // Procedia Structural Integrity. — 2023. — № 49. — С. 43–50. Web of Science, Scopus (Авторский вклад соискателя 70%).

В статье представлены результаты численного исследования изменения эффективных механических свойств пористых скаффолдов из полилактида с морфологией на основе ТПМП на отдельных стадиях деградации под воздействием сжимающей нагрузки. Предложены две стратегии моделирования процессов деградации скаффолдов - объемная и поверхностная деградация. Выявлены принципиальные различия в предложенных подходах и проведена оценка влияния различных типов морфологии скаффолда на изменение эффективных упругих свойств. Соискателем приведены результаты разработки периодических структур с контролируемыми морфометрическими параметрами, соответствующих отдельным стадиям поверхностной деградации. Описаны результаты оценки их механического отклика на различных этапах деградации. Приведены полученные новые данные о влиянии морфологии ячейки и её морфометрических параметров на механический отклик структуры за счет сопоставления результатов математического моделирования деформационного поведения на основе методов статистического анализа.

6. Elenskaya N. Effect of degradation in polymer scaffolds on mechanical properties: Surface vs. bulk erosion / N. Elenskaya, P. Koryagina, M. Tashkinov, V. Silberschmidt // Computers in Biology and Medicine. — 2024. — Т. 174 — С. 108402. Web of Science, Scopus, Q1 (Авторский вклад соискателя 70%)

В статье приведены результаты изучения изменения эффективных механических свойств функционально-градиентных скаффолдов с линейным градиентом пористости и морфологией на основе ТПМП на различных этапах деградации под воздействием сжимающей нагрузки. Изложены принципиальные различия в предложенных подходах к моделированию объемной и поверхностной деградации и приведены результаты оценки влияния различных типов морфологии скаффолда на изменение эффективных упругих свойств. Соискателем приведены результаты моделирования деформационного поведения периодических и функционально-градиентных структур с контролируемыми морфометрическими параметрами. Также соискателем описано влияние различных морфометрических характеристик, связанных с выбором элементарной ячейки, на механическое поведение исследованных структур.

7. Bratsun D. Numerical analysis of permeability of functionally graded scaffolds / D. Bratsun, N. Elenskaya, R. Siraev, M. Tashkinov // Fluid Dynamics & Materials Processing. — 2024. — Vol. 20. — № 7. — P. 1463-1479. Web of Science, Scopus, Q4 (Авторский вклад соискателя 25%).

В статье приведены результаты численного исследования гидродинамической проницаемости функционально-градиентных структур на основе ТПМП. Проницаемость

функционально-градиентных материалов была изучена в рамках как микроскопического подхода, основанного на уравнении Навье-Стокса, так и усредненного описания фильтрации жидкости через пористую среду на основе уравнений моделей Дарси или Форхгеймера. Приведены результаты расчетов коэффициентов проницаемости, изучены свойства структур при прямом и обратном потоках жидкости и определены диапазоны чисел Рейнольдса, для которых применимо описание в рамках модели Дарси или Форхгеймера. Соискателем приведены результаты моделирования функционально-градиентных структур с контролируемыми параметрами градиента на основе разработанных математического алгоритма и программного продукта.

8. Crack Propagation in TPMS Scaffolds under Monotonic Axial Load: Effect of Morphology / Shalimov A., Tashkinov M., Elenskaya N. [et al.] // Medical Engineering & Physics. — 2024. — С. 104235. Web of Science, Scopus, Q3 (Авторский вклад соискателя 20%).

В статье приведены результаты исследования механического поведения и разрушения скаффолдов на основе ТПМП. Оценивается влияние типа элементарной ячейки и её морфометрических параметров на докритическое, критическое и посткритическое поведение скаффолдов при монотонных режимах нагружения. Полученные результаты дают представление о поведении при разрушении и основных точках риска зарождения трещин в структурах АМ-PLA-скаффолдов на основе типичных широко используемых типов ТПМП, а также о влиянии типа структуры и внешней нагрузки на это поведение. Соискателем приведены результаты разработки периодические структуры на основе ТПМП с контролируемыми морфометрическими параметрами.

9. Еленская Н. В. Вычислительный модуль для создания геометрических моделей для трехмерных градиентных взаимопроникающих структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей типа «I-WP». – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680746 от 16.12.2021

10. Еленская Н. В. Вычислительный модуль для создания геометрических моделей для трехмерных градиентных взаимопроникающих структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей типа «Гироид». – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680743 от 16.12.2021

11. Еленская Н. В., Ташкинов М. А. Программа для генерации конечно-элементных функционально-градиентных структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684068 от 12.12.2022 (Авторский вклад соискателя – 50%)

12. Еленская Н. В. Программа для оценки статистического распределения полей на основе данных конечно-элементных моделей / Н. В. Еленская, Е. А. Кононов, Ю. В. Пирогова, М. А. Ташкинов. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022684067 от 12.12.2022 (Авторский вклад соискателя – 25%)

13. Еленская Н. В. Программный продукт для анализа изменений пористости решетчатых структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей. –

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682507 от 24.10.2023

14. Еленская Н. В. Программный продукт для анализа численных стратегий моделирования процесса деградации в скаффолдах на основе трижды периодических минимальных поверхностей. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682312 от 24.10.2023

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработан** новый алгоритм для рационального проектирования структуры скаффолдов на основе ТПМП, позволяющий формировать в широком диапазоне их морфометрические характеристики. Изменение геометрии осуществляется за счет последовательного варьирования отдельных коэффициентов, входящих в аналитические выражения для ТПМП;
- **разработан** комплекс проблемно-ориентированных программ для дискретизации моделей периодических и функционально-градиентных пористых структур на основе ТПМП на конечные элементы и перехода к конечно-элементному моделированию;
- **реализован** способ анализа полученных результатов численного моделирования механического отклика структур на основе статистических распределений напряжений;
- **предложен** новый способ моделирования структур для замещения поврежденной структурно-неоднородных участков костной ткани в переходной трабекулярно-кортикальной зоне;
- **проведена** оценка адекватности построенных математических моделей сопоставлением полученных результатов с результатами измерений механического отклика аддитивно изготовленных прототипов.

Теоретическая значимость исследования обоснована разработкой и реализацией нового подхода для проектирования геометрии структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей, их адаптации к требованиям со стороны замещаемой костной ткани, что расширяет возможности по созданию имплантов для эффективного замещения поврежденного фрагмента костной ткани.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс существующих базовых методов исследования: метод разбиения TetGen для дискретизации полученной геометрии, метод конечных элементов для моделирования механического поведения разработанных моделей, методы статистического анализа для оценки распределения напряжений в конструкции.

Значимость полученных соискателем результатов исследования для практического применения подтверждается тем, что предложенные в работе подходы и алгоритмы, в том числе реализованные и зарегистрированные в виде пакетов

прикладных программ для ЭВМ, могут быть применены для решения прикладных задач, связанных с проектированием персонализированных структур медицинского назначения со сложной неоднородной структурой – скаффолдов для замещения и восстановления костных дефектов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- корректное использование методов и подходов математического моделирования, вычислительной математики и механики деформируемого твердого тела при проведении численных расчетов;
- согласованность результатов численного исследования с полученными соискателя экспериментальными данными;
- результаты экспериментальных исследований, представленные в диссертации, были получены при использовании современного испытательного оборудования научно-исследовательской лаборатории «Механика биосовместимых материалов и устройств» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Личный вклад соискателя состоит в проведении литературного обзора по тематике исследования, разработке численных алгоритмов и программ их реализации для создания, дискретизации и оценки деформационного поведения решетчатых структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей; разработке способа адаптации параметров полученных моделей к параметрам замещаемого фрагмента костной ткани; проведении численных расчетов и обработке полученных данных, а также сопоставлении данных вычислительного эксперимента с экспериментальными данными.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 28 мая 2024 г. № 27-О: в диссертации содержится формулировка задачи рационального проектирования решетчатых структур на основе трижды периодических минимальных поверхностей для замещения поврежденной костной ткани, предложен и реализован подход к проектированию таких объектов с привязкой к морфометрическим параметрам замещаемого фрагмента костной ткани и к требуемому механическому отклику, определенному на основе анализа распределения напряжений в объеме структуры, что имеет важное значение для развития методик при разработке эндопротезов для применения в тканевой инженерии костной ткани.

На заседании «17» декабря 2024 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19 принял решение присудить Еленской Наталии Витальевне ученую степень кандидата физико-математических наук (протокол заседания № 7).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации,

участвовавших в заседании, из 13 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 13, против присуждения ученой степени – 0.

Председатель
диссертационного совета Д III

Ученый секретарь
диссертационного совета Д III



___ /Трусов П.В./

↳ фамилия, имя, отчество

___ /Кротова Е.Л./

↳ фамилия, имя, отчество

«17» декабря 2024 г.

м.п.