

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

**МЕХАНИКА БИОМЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ
И УСТРОЙСТВ (МБМУ-2025)**

Материалы II Международной конференции
(Пермь, 15–17 июля 2025 г.)

**MECHANICS OF BIOMEDICAL MATERIALS
AND DEVICES**

2nd International Conference
(Perm, July 15–17)

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2025

УДК 531/534+61+57.089
М55

М55 **Механика** биомедицинских материалов и устройств (МБМУ-2025) : материалы II Международной конференции, Пермь, 15–17 июля 2025 г. / ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2025. – 136 с.

ISBN 978-5-398-03362-5

Целью конференции является обмен опытом среди специалистов в области биомеханики, материаловедения, экспериментальной механики, моделирования и производства, а также практикующих врачей для обсуждения достижений в области биомедицинских устройств (стентов, имплантатов, скаффолдов, протезов, стимуляторов, катетеров, эндоскопов, датчиков и т.д.), материалов для их производства, а также вопросов взаимодействия искусственных объектов и живых тканей.

The aim of the conference is to share knowledge and expertise among researchers in biomechanics, materials science, experimental mechanics, modeling and manufacturing, as well as medical practitioners to discuss recent developments in biomedical devices (stents, implants, scaffolds, prostheses, sensors, etc.), materials for their production and questions of their interaction with native tissues.

УДК 531/534+61+57.089

ISBN 978-5-398-03362-5

© ПНИПУ, 2025

Тематика конференции

- Механика биологических и биомедицинских материалов
- Механические свойства биомедицинских изделий
- Проектирование и производство биомедицинских изделий
- Взаимодействие жидких и газообразных сред с твердыми телами
- Разрушение и прочность биосовместимых материалов и изделий из них
- Металлические и полимерные материалы для биомедицинских изделий
- Моделирование деформационного поведения биомедицинских изделий
- Математические модели биологических и медицинских систем
- Аддитивные технологии в биомедицине
- Биорезорбция и биодеградация медицинских изделий
- Вопросы биосовместимости материалов
- Взаимодействие медицинских изделий с органами и тканями
- Клинические вопросы, связанные с применением медицинских изделий
- Медицинские изображения и их обработка
- Исследования *in vitro* и *in vivo*

Программный комитет

Председатель – А.И. Швейкин, Пермь, Россия
Сопредседатель – М.А. Ташкинов, Пермь, Россия
Сопредседатель – А.Г. Кучумов, Пермь, Россия
Ученый секретарь – Н.В. Еленская, Пермь, Россия

Члены программного комитета

Д. Абдо, Абу-Даби, ОАЭ	О.П. Красных, Пермь, Россия
Г.А. Абейгунавардане, Моратува, Шри-Ланка	К.Р. Муратов, Пермь, Россия
Т.Р. Абляз, Пермь, Россия	Ф. Немавхола, Дурбан, ЮАР
Х. Алам, Маскат, Оман	Т. Панделани, Претория, ЮАР
С.М. Босяков, Минск, Беларусь	А.Г. Рогожников, Пермь, Россия
Ш. Бос, Джамму, Индия	В.В. Родионова, Калининград, Россия
Д.А. Брацун, Пермь, Россия	Ю.А. Рожкова, Пермь, Россия
П.С. Волегов, Пермь, Россия	П.В. Трусов, Пермь, Россия
Н.А. Еникеев, Уфа, Россия	А.Н. Труфанов, Пермь, Россия
Л. Жао, Нанкин, Китай	Д.Н. Трушников, Пермь, Россия
Д.В. Иванов, Саратов, Россия	И.Н. Шардаков, Пермь, Россия

Организационный комитет

Председатель – М.А. Ташкинов, Пермь, Россия
Секретарь конференции – Н.В. Еленская, Пермь, Россия

Члены организационного комитета

Виндокуров И.В., Пермь, ПНИПУ	Пятковский Н.В., Пермь, ПНИПУ
Долгих Д.А., Пермь, ПНИПУ	Рудакова М.А., Пермь, ПНИПУ
Корягина П.О., Пермь, ПНИПУ	Сотин А.В., Пермь, ПНИПУ
Лобов Е.С., Пермь, ПНИПУ	Тарасова А.С., Пермь, ПНИПУ
Пирогова Ю.В., Пермь, ПНИПУ	Шалимов А.С., Пермь, ПНИПУ

Спонсоры



Conference topics

- Mechanics of biological and biomedical materials
- Mechanical properties of biomedical products
- Modeling the deformation behavior of biomedical products
- Mathematical models of biological and medical systems
- Fracture and strength of biocompatible materials and products made from them
- Design and production of biomedical products
- Additive technologies in biomedicine
- Metallic and polymeric materials for biomedical products
- Bioresorption and biodegradation of medical devices
- Biocompatibility issues of materials
- Interaction of liquid and gaseous media with solids
- Interaction of medical devices with organs and tissues
- *In vitro* and *in vivo* studies
- Medical imaging and image processing
- Clinical issues related to the use of medical devices

Program Committee

Chairman – Alexey Schweikin, Perm, Russia

Co-chair – Mikhail Tashkinov, Perm, Russia

Co-chair – Alex Kuchumov, Perm, Russia

Scientific secretary – Nataliya Elenskaya, Perm, Russia

Members of Program Committee

Dani Abdo, Abu Dhabi, UAE

Gayan Abeigunawardane, Moratuwa, Sri Lanka

Timur Ablyaz, Perm, Russia

Khurshid Alam, Muscat, Oman

Sergei Bosyakov, Minsk, Belarus

Shirsha Bose, Jammu, India

Dmitry Bratsun, Perm, Russia

Pavel Volegov, Perm, Russia

Nariman Enikeev, Ufa, Russia

Liguo Zhao, Nanjing, China

Dmitriy Ivanov, Saratov, Russia

Olga Krasnykh, Perm, Russia

Karim Muratov, Perm, Russia

Fulufhelo Nemavhola, Durban, South Africa

Thanyani Pandelani, Pretoria, South Africa

Alexey Rogozhnikov, Perm, Russia

Valeria Rodionova, Kaliningrad, Russia

Yulia Rozhkova, Perm, Russia

Petr Trusov, Perm, Russia

Aleksandr Trufanov, Perm, Russia

Dmitriy Trushnikov, Perm, Russia

Igor Shardakov, Perm, Russia

The Organizing Committee

Chairman – Mikhail Tashkinov, Perm, Russia

Conference Secretary – Nataliya Elenskaya, Perm, Russia

Members of the Organizing Committee

Ilya Vindokurov, Perm, Russia

Daria Dolgikh, Perm, Russia

Polina Koriagina, Perm, Russia

Evgenii Lobov, Perm, Russia

Yulia Pirogova, Perm, Russia

Nikita Piatkovsky, Perm, Russia

Maria Rudakova, Perm, Russia

Aleksandr Sotin, Perm, Russia

Anastasia Tarasova, Perm, Russia

Aleksandr Shalimov, Perm, Russia

Sponsors



СОДЕРЖАНИЕ/ TABLE OF CONTENTS

<i>Артур Крупнин, Тимур Азаматов, Всеволод Побежимов, Александр Несмелов</i> Аналитическое и экспериментальное исследование прочности и жесткости композиционных полимерных образцов, изготовленных с применением 3D-печати.....	14
<i>Наталья Анисимова, Нариман Еникеев, Керям Новрузов, Гулялек Бабаева, Михаил Киселевский</i> Пористые скаффолды на основе титанового сплава ВТ6 для онкоортопедии: влияние размера пор и упорядоченной структуры на биоактивные свойства <i>in vivo</i>	15
<i>Кристина Антипова, Артур Крупнин, Елена Храмова, Тимофей Григорьев</i> Механическое поведение композиционных гидрогелей, наполненных пористыми микрочастицами	16
<i>Мария Антонова, Юрий Петров</i> Структурно-временные характеристики разрушения биомедицинских магниево-кальциевых сплавов	17
<i>Алина Ахметзянова, Елена Семенова, Оскар Саченков, Татьяна Балтина</i> Механика костной ткани у крыс в условиях двигательных нарушений. Методы оценки механических параметров костной ткани.....	18
<i>Асия Байкузина, Наталья Казанцева, Арина Кузьмина, Николай Сахаров, Юлия Козмец</i> Влияние скорости сканирования лазера на качество печати имплантатов из порошка стали 316L методом селективного лазерного сплавления	20
<i>Никита Кондратьев, Матвей Балдин, Андрей Подседерцев</i> Определение эффективных свойств материала в ультратонком коронарном стенте с применением многоуровневой модели	21
<i>Евгений Матвеев, Игорь Безукладников</i> Применение аддитивных технологий для решения задач современной медицины.....	22
<i>Ильмир Бекеров</i> Об упрощенной модели сокращения скелетной мышцы	22
<i>Вячеслав Ладейщиков, Валерий Столбов, Михаил Суханов, Илья Белков, Владимир Онискив, Александр Сотин</i> Использование современных материалов для замещения дефектов костей черепа	23
<i>Игорь Беспалов, Рашид Шафигулин, Никита Тугашев, Павел Большаков, Никита Харин, Ильдар Ахтямов, Оскар Саченков</i> Определение механических свойств метаматериалов и влияние их макроархитектуры на кинетику высвобождения антибиотиков	25

<i>Леонид Бионьшев, Александр Сотин, Юлия Лукина</i> Компьютерное моделирование механического поведения аппаратов внешней фиксации при устранении варусных деформаций нижних конечностей.....	26
<i>Тимур Абляз, Евгений Шлыков, Владимир Блохин, Илья Осинников</i> Особенности формирования микрорельефа поверхности композитных материалов нового поколения после копировально-прошивной электроэрозионной обработки.....	27
<i>Анастасия Богданова, Анна Каменских, Юрий Носов</i> Анализ влияния термомеханики антифрикционных материалов на напряженно-деформированное состояние защитных прослоек.....	28
<i>Дмитрий Брацун, Иван Красняков</i> Микроскопическое моделирование роста ткани в волнистом канале под влиянием сдвиговых напряжений.....	29
<i>Дмитрий Брацун, Рамиль Сираев, Наталия Еленская</i> Численный анализ проницаемости пористого TPMS-материала	31
<i>Максим Бузмаков, Дмитрий Брацун</i> Стохастическое моделирование несимметричного репрессилатора	32
<i>Илья Виндокуров, Михаил Ташкинов</i> Экспериментальное исследование коэффициента Пуассона 3D-печатных образцов из PLA и PEEK с разным углом заполнения	33
<i>Евгений Воробьев, Юлия Гришина, Григорий Дьяконов</i> Коррозионное поведение сплавов системы Mg-1Zn-xCa в различном микроструктурном состоянии	34
<i>Тимур Гамилов</i> Методики неинвазивного определения фракционного резерва кровотока	35
<i>Елена Семенова, Виктория Смирнова, Олег Герасимов</i> Применение цифрового прототипа при определении эффективных механических свойств пористых материалов	36
<i>Никита Головкин, Олеся Никуленкова, Кристина Антипова, Всеволод Побежимов, Даниил Романенко, Александр Несмелов, Артур Крупнин</i> Проектирование и экспериментальные исследования прототипа персонализированного гибридного протеза межпозвонкового диска.....	38
<i>Марина Гребенищикова, Егор Кондратьев, Михаил Миронов</i> Биосовместимые материалы многослойных покрытий на основе гафния для имплантатов.....	39
<i>Вioletта Гридина, Геннадий Рогожников, Юлия Каракулова, Ольга Гилева, Оксана Шулятникова, Владислав Никитин</i> Биомеханическое обоснование применения капы из полиамида, армированного наноразмерным диоксидом титана, для лечения пациентов с гипертонусом жевательных мышц	40

<i>Александр Доль, Дмитрий Иванов</i> О стандартизации механических экспериментов с биоматериалами	41
<i>Нариман Еникеев, Александр Рыжкин, Алексей Капустин, Марина Абрамова, Светлана Гатина, Керям Новрузов, Наталья Анисимова, Михаил Киселевский</i> Пористые структуры для передовых биоактивных титановых имплантатов	42
<i>Виктор Мусалимов, Елена Седакова, Михаил Ерофеев, Артем Кузнецов</i> Канонические закономерности ударно-фрикционного взаимодействия стопы с опорной поверхностью	43
<i>Максим Журкевич, Антон Калинин</i> Определение экономической эффективности разработки и организации производства медицинских изделий	44
<i>Вера Затонская, Наталья Еленская, Евгений Кононов, Михаил Ташикинов</i> Адаптация механического отклика костных скаффолдов при сжатии с помощью оптимизации их внутренней структуры.....	46
<i>Владимир Зубцов, Юлия Лукина, Арчил Цискарашвили</i> Моделирование поведения аппарата Илизарова под нагрузкой: сопоставление результатов ANSYS и натурных испытаний	47
<i>Татьяна Нефедова, Дмитрий Сидоренко, Александр Доль, Дмитрий Иванов</i> К вопросу оценки механических свойств позвонков по компьютерной томограмме	48
<i>Евгения Ильина, Павел Королёв, Леонид Маслов</i> Эффективные упругие свойства биополимерных скаффолдов на основе трижды периодических минимальных поверхностей.....	49
<i>Наталья Казанцева, Максим Ильиных, Виктор Кузнецов, Юлия Козмец, Максим Карабаналов</i> Усталостные испытания изделий медицинского назначения, полученных с помощью аддитивных технологий.....	50
<i>Марат Камалтдинов</i> Математическая модель течения в желудке и дуоденуме: применение ультразвуковых исследований для идентификации параметров моторики при различной пищевой нагрузке.....	51
<i>Иван Каманцев, Антон Голоднов, Марина Сухова, Сергей Беликов, Даниил Лазарев</i> Оценка влияния технологических дефектов на несущую способность конструкций с периодической и квазипериодической структурами	52
<i>Илья Келлер, Илья Виндокуров, Анатолий Адамов, Наталья Еленская, Михаил Ташикинов</i> Вязкоупругость и рэтчетинг полилактида	53

<i>Полина Килина, Андрей Дроздов, Алексей Кучумов</i> Формирование стентов на основе CoCr и TiNi селективным лазерным плавлением	55
<i>Никита Князев, Александр Хмелевский, Всеволод Побежимов, Петр Дмитрияков, Сергей Малахов, Артур Крупнин</i> Получение скаффолдов с мультимодальной пористостью на основе полилактида методами 3D-печати и выщелачивания	56
<i>Марина Козик, Владислав Львов, Фёдор Сенатов, Александр Левин</i> Разработка дизайна спинального кейджа на основе метаматериала с контролируемыми свойствами, изготовленного из титанового сплава.....	57
<i>Никита Кондратьев, Кирилл Остапович, Матвей Балдин, Андрей Подседерцев, Алексей Швейкин</i> Цифровое проектирование функциональных материалов для биомедицинских изделий на базе многоуровневого моделирования.....	58
<i>Полина Корягина, Михаил Ташкинов, Наталия Еленская</i> Моделирование процессов деградации в пористых структурах на основе трижды периодических минимальных поверхностей.....	59
<i>Юлия Козмец, Наталия Казанцева, Игорь Ежов, Денис Давыдов</i> Определение усталостной прочности и механизмов разрушения СЛС-образцов из Ti-6Al-4V при циклических испытаниях на изгиб.....	60
<i>Никита Кропанев, Анна Каменских, Александр Горохов, Тимур Абляз, Евгений Шлыков</i> Анализ особенностей формообразования в процессе численного моделирования процесса электроэрозионной обработки с учетом теории пластичности материалов	61
<i>Артур Крупнин, Олеся Никуленкова, Всеволод Побежимов, Даниил Романенко, Александр Несмелов, Федор Сорокин</i> Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния пористых гироидных образцов, изготовленных из полилактида методом экструзионной 3D-печати	63
<i>Павел Кручинин, Надежда Алексеева</i> О моделировании удержания человеком равновесия при фронтальной ориентации качелей seesaw	64
<i>Арина Кузьмина, Наталия Казанцева, Асия Байкузина, Николай Сахаров, Игорь Ежов</i> Определение диапазона управляемых параметров лазерного 3D-принтера с целью получения высокого качества изделий сложной формы	65
<i>Юлия Куликова, Ольга Бабиц, Станислав Сухих</i> Изучение механических свойств и биосовместимости изделий из морского коллагена	66

<i>Евгений Лобов, Артем Пепеляев, Михаил Ташикинов</i> Влияние комбинаций армирования и матрицы на механические характеристики гибридных 3D-печатных композитов	67
<i>Юлия Лукина</i> Гидроксиапатитовый цемент: влияние состава на растворимость <i>in vitro</i> и резорбцию <i>in vivo</i>	68
<i>Владислав Львов, Фёдор Сенатов</i> Межтеловые кейджи на основе ауксетического метаматериала: концепция проектирования в САПР, 3D-печать и механические испытания	69
<i>Наталья Мартыненко, Диана Темралиева, Елена Лукьянова, Ольга Рыбальченко</i> Влияние ротационнойковки на механические свойства, коррозионную стойкость и биосовместимость сплава Mg-Zn-Ca	70
<i>Леонид Маслов, Евгения Ильина, Павел Королёв</i> Междисциплинарные вопросы имитационного моделирования биофизических процессов регенерации костной ткани	71
<i>Мария Матросова, Марина Шмурак</i> Численный анализ влияния угла поворота позвоночной артерии на показатели гемодинамики	72
<i>Дмитрий Мерсон, Алексей Данюк, Евгений Мерсон, Александр Брилевский</i> Биорезорбируемые имплантаты на основе сплава ZX10: связь механических и коррозионных свойств с технологией ТМО	73
<i>Евгений Мерсон, Виталий Полуянов, Павел Мягих, Дмитрий Мерсон</i> Влияние термомеханической обработки на стойкость к коррозионному растрескиванию под напряжением биорезорбируемого магниевого сплава ZX10	74
<i>Ирина Мизева, Наталья Подолян, Роман Ромашко, Виктор Кащенко, Мария Васильева, Анастасия Саковская, Олег Мамонтов, Алексей Камшилин</i> О влиянии локального нагрева периферической области тела на время прихода пульсовой волны	76
<i>Юрий Носов, Анна Каменских</i> Вязкоупругое и вязкоупругопластическое поведение смазок	77
<i>Тимур Абляз, Евгений Шлыков, Илья Осинников, Владимир Блохин</i> Исследование процесса копировально-прошивной электроэрозионной обработки электродами-инструментами, полученными аддитивными методами	78
<i>Денис Павлецов, Наталья Еленская, Евгений Садырин, Илья Виндокуров, Михаил Ташикинов</i> Моделирование механического отклика реконструированных на различных этапах деградации образцов скаффолдов	79

<i>Ирина Паришина, Илья Виндокуров, Михаил Ташинов, Евгений Садырин, Александр Доль, Дмитрий Иванов</i>	
Исследование механических и структурных свойств губчатой кости головок бедра человека	81
<i>Ирина Пащенко, Михаил Ташинов</i>	
Трибологические свойства аддитивно изготовленных биосовместимых материалов	82
<i>Кирилл Первухин, Артем Филиппов, Юрий Карнаухов, Евгений Лутюшкин, Виталий Лосев</i>	
Механические свойства углепластиковых заготовок протезов стоп человека	83
<i>Юлия Пирогова, Михаил Ташинов</i>	
Исследование влияния трехмерной архитектуры скаффолдов на возможности репликации механических и морфометрических свойств трабекулярной кости	84
<i>Всеволод Побежимов, Артур Крупнин, Денис Брешенков, Эдуард Чарчян</i>	
3D-печать в цилиндрической системе координат: медицинские приложения	85
<i>Максим Подоприхин, Владимир Китов, Павел Кручинин</i>	
Разработка методики оценки качества движений при коррекции вертикальной стойки человека после толчка в грудь	86
<i>Татьяна Полякова, Сергей Гаврюшин</i>	
Математическое моделирование временной имплантации в рамках мультиагентного подхода	87
<i>Егор Разумовский</i>	
Биологические процессы как факторы изменчивости механического поведения бедренного компонента эндопротеза тазобедренного сустава из УУКМ с поврежденной пироуглеродной матрицей	88
<i>Полина Колоколова, Тимофей Роденков, Артур Крупнин, Кристина Антипова, Алина Истомина</i>	
Определение механических характеристик композиционных гидрогелей на основе полиакриламида: многомасштабное моделирование с применением метода конечных элементов и натуральный эксперимент	89
<i>Александр Рыжкин, Нариман Еникеев, Денис Мельников</i>	
Проектирование аддитивно получаемого пористого титанового сплава для ортопедических применений	90
<i>Андрей Савченко, Александр Уласевич, Александр Анищ, Денис Бодяк, Владимир Минченя</i>	
Вопросы хранения медицинских изделий на основе нитинола	91

<i>Екатерина Садовченко, Михаил Жмайло, Елизавета Черновол</i> Использование модального анализа для оценки стабильности дентальных имплантатов	92
<i>Евгений Садырин, Павел Антипов, Егор Лактионов, Майкл Свэйн</i> Характеризация свойств современных стоматологических материалов неоднородной структуры и окружающих их биологических тканей зуба	93
<i>Михаил Цинкер, Петр Трусов, Полина Свинцова</i> Математическая модель дыхательной системы человека: исследование течения воздуха в воздухоносных путях	94
<i>Владимир Сердюков, Татьяна Шашкина, Дарья Коростовская, Софья Экишарова, Юлия Пеценюк</i> Анализ биомеханики ходьбы ампутантов нижних конечностей с помощью системы захвата движений	95
<i>Дмитрий Сидоренко, Леонид Бессонов</i> Пороговое значение единиц Хаунсфилда для прогнозирования потери стабильности фиксации сегмента L4–L5 позвоночника.....	96
<i>Рамиль Сираев</i> Моделирование полимеразной цепной реакции в системе естественной конвекции	97
<i>Виктория Смирнова, Елена Семенова, Оскар Саченков</i> Топологический анализ поведения пациентов на основе персистентных гомологий и данных видеофиксации	98
<i>Денис Краснов, Аркадий Соловьев, Мария Германчук, Александр Епихин</i> Моделирование процесса аккомодации искусственного хрусталика с помощью подвижных интраокулярных линз	99
<i>Дарья Спорышева, Илья Виндокуров, Михаил Ташикинов, Юлия Куликова</i> Определение характеристик и параметров биопечати гидрогелей на основе коллагена морских организмов	100
<i>Вероника Струкова, Анна Каменских, Юрий Носов, Дмитрий Пустовалов</i> Анализ параметров 3D-печати фотополимерных моделей	101
<i>Андрей Сырвачев, Елена Кротова</i> Прототип бионического протеза руки человека	102
<i>Артем Творогов, Вячеслав Лезин, Станислав Чернышихин, Вадим Шереметьев</i> Дизайн пористых биоматериалов для ортопедических имплантатов из сплава Ti-6Al-4V, полученных методом селективного лазерного плавления	103
<i>Нина Тимофеева, Сандаара Захарова, Светлана Артахинова</i> Разработка и биомедицинская характеристика коллаген-полилактидных композитов: сравнительное исследование <i>in vitro</i> и <i>in vivo</i>	104

<i>Полина Тюбаева, Иветта Варьян, Анатолий Попов</i> Создание биомиметических материалов для ускоренного заживления ран на основе поли-3-гидроксibuтирата, гемина и фибриногена	105
<i>Михаил Фролов, Михаил Смольков, Александр Бурчаков, Александр Крутов</i> Механические свойства метаматериалов на основе Р поверхностей	106
<i>Данил Хамзин, Олег Герасимов, Оскар Саченков</i> Оптимизация структуры на основе данных цифрового прототипа	107
<i>Рушан Хасянов, Михаил Таишинов</i> Композиционные материалы для имплантирования на основе модифицированного PLA	109
<i>Александр Хмелевский, Никита Князев, Всеволод Побежимов, Александр Несмелов, Алексей Ступников, Петр Дмитриков, Сергей Малахов, Денис Брешенков, Эдуард Чарчян, Артур Крупнин</i> Влияние рентгеноконтрастных наполнителей на свойства композиционных материалов на основе полилактида.....	110
<i>Денис Хорошев, Олег Ильялов</i> Моделирование позвоночно-двигательного сегмента L4–L5 с учетом связок: гиперрецепция в фасеточном суставе.....	111
<i>Михаил Цинкер, Петр Трусов, Владислав Нурисламов</i> Математическая модель дыхательной системы человека: исследование течения воздуха в деформируемых легких.....	112
<i>Нагим Шакиров, Андрей Судаков</i> Реологические свойства крови и методы их измерения	113
<i>Александр Шалимов, Михаил Таишинов</i> Влияние локального разрушения структурных элементов на параметры эффективного механического отклика пористых структур	114
<i>Леонид Бионьшев, Марина Шмурак</i> Анализ рисков сосудистых осложнений при использовании аппарата Илизарова модификации Багирова на голени.....	115
<i>Андрей Яцун, Ирина Привалова, Мария Щербакова, Андрей Лысых</i> Экспериментальные методы оценки эффективности промышленных экзоскелетов	117
<i>Арсений Фацевский, Екатерина Лазарева, Артем Мыльников, Никита Наволокин, Ирина Янина</i> Разработка биосовместимого комплекса для фотодинамической терапии	118
<i>Shirsha Bose</i> Understanding the interactions of artificial sphincters with urethra using in-silico models.....	119
<i>Daria Dolgikh, Mikhail Tashkinov</i> Numerical analysis of the influence of microarchitectural features on the strength characteristics of 3D-printed exoprosthetic sockets with local reinforcement	120

<i>Nataliya Elenskaya, Ilia Vindokurov, Ekaterina Smotrova-Kayali, Mikhail Tashkinov</i>	
Modeling functionally-graded lattice scaffold structure with mechanical behavior and morphometric parameters	121
<i>Aleksandr Khairulin, Alex G. Kuchumov</i>	
Fluid structure interaction analysis of parametric stent geometry influence on wall shear stress-induced low density lipoprotein accumulation	122
<i>Alex G. Kuchumov, Nikita Pil, Aleksandr Khairulin, Denis Khoroshev</i>	
Application of biomedical engineering methods to challenge cardiovascular surgery problems	123
<i>Alexandra Lyubimova, Alex G. Kuchumov</i>	
The influence of blood models on the hemodynamic characteristics of the flow in the circle of Willis	124
<i>Fulufhelo Nemavhola</i>	
Multiscale Modelling of Myocardial Infarction and Remodelling: Where Are We and What Is Next?	126
<i>Andrei Nikitin, Siarhei Bosiakov</i>	
Estimation of mechanical properties of cellular structures based on modified Gibson – Ashby cell	127
<i>Thanyani Pandelani, Harry Ngwangwa, Fulufhelo Nemavhola</i>	
Hyperelastic Parameter Estimation for Rat Myocardium: Insights into Regional Cardiac Tissue Mechanics	129
<i>Nikita Piatkovsky, Mikhail Tashkinov</i>	
Manufacturing of Tubular Objects with Variation of Shape and Cross-Section Parameters using Non-Planar Multi-Axial 3D-Printing.....	130
<i>Nikita Pil, Alex G. Kuchumov</i>	
Coupled Electrophysiological Left Ventricle–Aortic Valve FSI Model of Blood Flow.....	131
<i>Evgeniy Pyriaev, Katerina Beklemisheva</i>	
Numerical simulation of tissue construction process based on acoustic levitation techniques.....	132
<i>Ekaterina Smotrova-Kayali, Simin Li, Vadim V. Silberschmidt</i>	
Modelling trabecular bone adaptation using embedded configuration	133
<i>Anastasia Tarasova, Mikhail Tashkinov</i>	
Numerical Investigation of Thermo-Mechanical Behavior of Auxetic Cylindrical Structures	134

АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ 3D-ПЕЧАТИ

**Артур Крупнин ^{1,2}, Тимур Азаматов ^{2*}, Всеволод Побежимов ¹,
Александр Несмелов ¹**

¹ НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, г. Москва, 123182, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
2-я Бауманская ул., 5, г. Москва, 105005, Россия

* e-mail: tazamatov1707@gmail.com

Полимерные и полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в различных отраслях науки и техники, в том числе благодаря возможности выбора в качестве матрицы и армирующего наполнителя материалов, наилучшим образом отвечающих требуемым свойствам конечного изделия. В последние годы в области изготовления полимерных изделий все большее распространение получает технология экструзионной 3D-печати. Широкое распространение ПКМ получили в медицине благодаря возможности использовать биосовместимые биоразлагаемые полимеры для решения широкого класса задач: замещения дефектов костной ткани, проектирования имплантатов для челюстно-лицевой хирургии, вертебрологии и т.д. Таким образом, важной является задача исследования механических свойств этих материалов, а также построение моделей, способных предсказывать механическое поведение этих образцов при различных вариантах нагружения.

В работе проведена серия испытаний на кручение и одноосное растяжение/сжатие образцов из коммерческого на основе нейлона и углеволокна eSun ePA12-CF. Образцы для испытаний на растяжение изготовлены по стандарту ASTM D638-IV, для испытаний на сжатие – по стандарту ASTM D695, для испытаний на кручение – на основе стандартов ASTM D1043 и ASTM D638. По результатам испытаний получены кривые деформирования образцов, на основе которых построены зависимости модуля упругости, модуля сдвига и предела прочности от угла укладки. Рассмотрены различные способы определения коэффициента Пуассона. На основе соотношений теории слоистых пластин и критерия Цая – Хилла предложены аналитические модели, способные предсказать полученные экспериментально зависимости.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

ПОРИСТЫЕ СКАФФОЛДЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ДЛЯ ОНКООРТОПЕДИИ: ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ПОР И УПОРЯДОЧЕННОЙ СТРУКТУРЫ НА БИОАКТИВНЫЕ СВОЙСТВА *IN VIVO*

Наталья Анисимова ^{1*}, Нариман Еникеев ^{2*}, Керям Новрузов,
Гулялек Бабаева ¹, Михаил Киселевский ¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Блохина,
Каширское шоссе, 24, г. Москва, 115522, Россия

² Уфимский университет науки и технологий,
ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, 450076, Россия

* e-mail: nariman.enikeev@uust.ru

Совершенствование имплантируемых опороспособных конструкций для возмещения дефектов после резекции разрушенных опухолью костей остается актуальной проблемой современной онкоортопедии. Разработка при помощи аддитивных технологий титановых скаффолдов с контролируемой пористой структурой нацелена на приближение механических свойств имплантата к характеристикам костной ткани и стимуляции их внутрикостной интеграции. Кроме того, пористые скаффолды могут быть нагружены клетками или препаратами с противоопухолевой активностью.

Целью исследования являлась оценка стимуляции скаффолдами на основе титанового сплава ВТ6 с различной структурой и размерами пор прорастания тканевых компонентов после подкожной имплантации лабораторным мышам, а также торможения роста привитой опухоли после нагрузки биоинженерным клеточным продуктом с противоопухолевой активностью.

Пористые титановые скаффолды были спроектированы на базе моделей трижды периодичных минимальных поверхностей с разной топологией и размерами пор. Экспериментальные образцы были изготовлены методом прецизионного селективного лазерного сплавления порошка сплава Ti-6Al-4V с размером частиц ~40 мкм. После термической обработки для снятия внутренних напряжений, обработки сжатым воздухом, отмывки и стерилизации имплантировали ненагруженные скаффолды мышам линии Balb/c, а нагруженные сингенными лимфокин-активированными киллерами (ЛАК) скаффолды – мышам Balb/c nude с привитой опухолью линии ЕМТ6. Длительность наблюдения 10 суток.

После имплантации ненагруженные скаффолды различной структуры прорастали соединительной тканью и сосудистой сетью с различной

интенсивностью. Введение ЛАК в перитуморальную область способствовало торможению роста опухоли в 5–7 раз в сравнении с контролем, вплоть до полной ее инволюции.

Таким образом, было показано, что титановые скаффолды с диаметром пор 500–700 мкм способны активно интегрироваться в ткани после имплантации. Кроме того, они могут эффективно выполнять функцию платформы для внесения цитотоксических компонентов для локальной циторедуктивной терапии с последующей резекцией остаточной опухоли и скаффолда.

Исследование было выполнено при поддержке гранта РФФ № 23-69-10003.

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ, НАПОЛНЕННЫХ ПОРИСТЫМИ МИКРОЧАСТИЦАМИ

**Кристина Антипова ^{1*}, Артур Крупнин ^{1,2},
Елена Храмцова ³, Тимофей Григорьев ¹**

¹ НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, г. Москва, 123182, Россия

² Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН,
ул. Косыгина, 4, г. Москва, 119334, Россия

³ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, стр.1, г. Москва, 105005, Россия

* e-mail: antipova.cg@gmail.com

Одна из ключевых задач тканевой инженерии как части регенеративной медицины состоит в воспроизведении живых тканей с использованием методов клеточной биологии и материаловедения, в том числе создании искусственного аналога внеклеточного матрикса (ВКМ). Несмотря на тканеспецифичные особенности, ВКМ обычно имеет пористую волокнисто-гелевую структуру, а его механические свойства, изменяющиеся в широком диапазоне значений, критически влияют на интеграцию имплантата и клеточные процессы (адгезию, пролиферацию, дифференцировку). Таким образом, при разработке биоподобного искусственного ВКМ необходимо точное регулирование этих параметров, что и является целью данной работы – разработка подходов и исследование механических свойств модельных композиционных скаффолдов для тканевой инженерии.

Объектом исследования выступали гидрогели на основе полиакриламида, наполненные пористыми частицами из полилактида. Степень сшивки, определяющую модуль упругости композита, варьировали от 1 до 2 %. Концентрация наполнителя составляла 0,5 и 1,0 мас.%. Однородность распределения наполнителя была подтверждена сканирующей акустической микроскопией. В готовом композите гидрогелевая фаза имеет однородную структуру и обнаруживается внутри пористых частиц.

Механические испытания при одноосном растяжении (Instron 5965, США) показали, что введение частиц в полиакриламидные гидрогели повышает их упругопрочностные характеристики и снижает асимметрию поведения при растяжении/сжатии, которая наблюдается для ненаполненных гидрогелей. Результаты экспериментов демонстрируют возможность тонкого регулирования механических свойств матриц в пределах, соответствующих значениям модуля Юнга мягких тканей.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

СТРУКТУРНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ БИМЕДИЦИНСКИХ МАГНИЕВО-КАЛЬЦИЕВЫХ СПЛАВОВ

Мария Антонова ^{1,2*}, Юрий Петров ^{1,2}

¹ Институт проблем машиноведения РАН,
Большой пр., 61, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7/9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия

* e-mail: maliya.antonova@gmail.com

Использование в качестве ортопедических имплантов не разлагающихся в организме металлов влечет за собой необходимость повторного хирургического вмешательства для их извлечения. Кроме того, возможно высвобождение токсичных ионов или микрочастиц в результате механических воздействий или коррозии металла. Соответственно, разработка биоматериалов для имплантов нового поколения, которые обладают необходимыми прочностными характеристиками и являются биоразлагаемыми, является актуальной задачей. Бинарные магниевые сплавы являются хорошими претендентами, поскольку высвобождение

ионов кальция и магния не только не вредит организму, но и способствует регенерации тканей. Низкую прочность магния регулируют за счет изменения структуры сплава. Однако большое количество кальция не только положительно влияет на прочность, но и увеличивает скорость биоразложения, из-за чего имплант может не выполнить свою функцию. Таким образом, доля кальция в составе магниевых-кальциевых сплавов и структура материала оказывает существенное влияние на механические и физические свойства. Кроме того, для магниевых сплавов при небольших размерах зерен даже при квазистатических воздействиях характерно явление зуба текучести, которое в области биоматериалов может оказать существенное влияние на поведение импланта и которое в связи с этим необходимо прогнозировать.

В работе представлены кривые деформирования сплавов Mg-0,3Ca (мас. %), Mg-0,5Ca (мас. %) и Mg-1,2Ca (мас. %) с различными размерами зерен, спрогнозированные вплоть до момента разрыва, при помощи комбинации модифицированной релаксационной модели пластичности с новым критерием разрушения, основанном на вычислении мощности диссипируемой энергии. Параметры использованных моделей были определены с помощью аппроксимации по имеющимся экспериментальным данным. Полученные характеристики, такие как время разрушения, критическое удлинение и уровень напряжений в процессе деформации, хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 22-11-00091.

МЕХАНИКА КОСТНОЙ ТКАНИ У КРЫС В УСЛОВИЯХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОСТНОЙ ТКАНИ

**Алина Ахметзянова*, Елена Семенова,
Оскар Саченков, Татьяна Балтина**

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
ул. Кремлёвская, 18, корп. 1, г. Казань, 420008, Россия

* e-mail: ahmetzyanovaa0@gmail.com

Одной из главных задач биомеханики является оценка механических параметров опорно-двигательного аппарата. В этом случае может

быть проведено исследование костной ткани в условиях различной степени тяжести двигательных нарушений. Обычные методы диагностики костной ткани, такие как денситометрия и компьютерная томография, не всегда демонстрируют полную картину о состоянии костей. Кроме того, в настоящее время отсутствуют эффективные методы для ранней диагностики остеопороза после травмы спинного мозга. В рамках данной работы на крысах моделировали контузионную травму спинного мозга по модифицированной методике A.R. Allen и полную перерезку спинного мозга. На 30-й день эксперимента проводились испытания костей на изгиб, рассчитывались механические свойства. Компьютерная томография использовалась для анализа образцов, данные обрабатывались в программе Avizo. Пористость определялась по количеству вокселей пор в кости в программе MatLab. В ходе исследования измерялись геометрические, массовые и прочностные свойства бедренной и большеберцовой костей.

Наблюдали разницу прочностных характеристик, таких как жесткость и упругость, при полном и контузионном повреждении. Анализ изображений компьютерной томографии показал значительные различия в характеристиках пор и их перераспределение внутри костного материала между экспериментальными группами. При этом результаты обработки изображений не коррелировали с результатами исследования костей на трехточечный изгиб, что исключает возможность достоверной диагностики исключительно по компьютерной томографии и подчеркивает актуальность данной работы. Моделирование травмы и последующий анализ механических свойств костей позволяют получить более полное представление о состоянии костной ткани и ее способности к восстановлению. Это открывает новые горизонты для разработки более точных и эффективных методов диагностики остеопороза и других заболеваний.

Работа выполнена при финансовой поддержке, выделенной Казанскому федеральному университету на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023-0009.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СКАНИРОВАНИЯ ЛАЗЕРА НА КАЧЕСТВО ПЕЧАТИ ИМПЛАНТАТОВ ИЗ ПОРОШКА СТАЛИ 316L МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

**Асия Байкузина ^{1,2*}, Наталия Казанцева ¹, Арина Кузьмина ^{1,2},
Николай Сахаров ^{1,2}, Юлия Козмец ^{1,2}**

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

² Уральский федеральный университет имени Первого президента России Б.Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620062, Россия

* e-mail: baikuzina.asia@yandex.ru

Аддитивное производство (АП) в настоящее время является перспективным направлением для получения изделий в различных отраслях промышленности, в том числе и медицине, за счет возможности использования биоинертных материалов для изготовления конструкций сложной формы в соответствии с анатомическим строением человеческого организма. Печать металлических имплантатов с помощью лазерного 3D-принтера имеет свои особенности, которые связаны с наличием градиента температур по толщине получаемого изделия и высокой скоростью охлаждения. Целью исследования является анализ влияния параметров лазерного 3D-принтера на качество участков различной толщины образца из порошка сплава 316L.

В работе исследовали канюлированные винты со сложной внутренней геометрией и резьбой, изготовленные методом селективного лазерного сплавления (СЛС). Для оптимизации режима печати варьировали скорость сканирования лазерного 3D-принтера. Относительную плотность образцов определяли методом Архимеда с использованием аналитических весов ОНАУС. Микротвердость по Виккерсу измеряли на микротвердометре «Металаб 502». Микроструктуру исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Tescan MIRA LMS.

Обнаружено влияние параметров 3D-печати на структуру, плотность и микротвердость полученного винта. Установлено, что участки СЛС образца с различной толщиной показывают зависимость дефектности от скорости сканирования лазерного принтера. При низкой скорости сканирования обнаружено небольшое количество дефектов в массивной части образца и значительное – в тонкой части. Увеличение скорости сканирования приводит к повышению дефектности во всех участках образца.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

Исследование выполнено в рамках Госзадания (регистрационный номер FSRR-2023-0009).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА В УЛЬТРАТОНКОМ КОРОНАРНОМ СТЕНТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ

Никита Кондратьев, Матвей Балдин *, Андрей Подседерцев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: matvej1999@gmail.com

В настоящее время во многих развитых областях механики, биомедицины и др. наблюдается интенсификация применения миниатюрных изделий и конструкций. Примером таковых служат коронарные стенты, толщина стойки в которых может составлять менее ста микрометров. В сечение стойки может укладываться лишь несколько зёрен с характерным размером десятков микрометров. В результате этого может происходить ослабление механических свойств и существенный разброс их по конструкции стента, вызванные статистическим размерным эффектом образца.

Была разработана многоуровневая модель описания неупругого поведения мультикристаллического материала (олигокристалла) коронарного стента. Неупругое деформирование зёрен реализуется путем движения краевых дислокаций, учитывается их взаимодействие с границами зёрен и свободными границами. Полагается, что выход дислокаций на свободную поверхность осуществляется беспрепятственно, что позволяет учитывать размерный эффект для миниатюрного изделия. Была реализована подпрограмма для коммерческого МКЭ-пакета, позволяющая учитывать неоднородность структуры и определять неоднородные механические свойства изделия, распределенные по его геометрии, для последующего решения краевых задач эксплуатации коронарного стента. Результаты моделирования свидетельствуют о возможности применения разработанной модели для описания эффективных механических свойств мультикристаллического материала из аустенитной стали AISI 316L и решения задач поиска зеренной структуры стента, оптимальной для его эксплуатации.

Исследование в части определения эффективных свойств различных вариантов конструкций стента выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОВРЕМЕННОЙ МЕДИЦИНЫ

Евгений Матвеев ^{1*}, Игорь Безукладников ^{1,2}

¹ ООО «Ф2 Инновации», ул. Академика Королева, 21Д, г. Пермь, 614068, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: info@fdm2.com

Доклад посвящен различным аспектам применения аддитивных технологий в медицине. Рассматривается использование 3D-печати для индивидуализации медицинских изделий (производство индивидуализированных медицинских устройств, включая протезы, ортезы и импланты, с учетом анатомических особенностей конкретного пациента); в разработке медицинских тренажеров, использование полимерной печати для создания анатомических точных моделей органов и частей тела, используемых в учебных целях для отработки медицинских манипуляций и диагностических навыков; применение микрошнековой технологии для трехмерной печати высокотехнологическими полимерами в гранульной форме. Особенности применения будут описываться на примере существующих совместных проектов компании «Ф2 Инновации», и ведущих вузов Пермского края – получаемых аддитивным способом компонентов изделия в рамках проекта «Бионический протез уха», разработки и производства полимерного культеприемника для протезов нижних конечностей, создания интеллектуальных компонентов медицинского стоматологического тренажера, 3D-принтера для гранульной микрошнековой печати.

ОБ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ СОКРАЩЕНИЯ СКЕЛЕТНОЙ МЫШЦЫ

Ильмир Бекеров*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Россия

* e-mail: omert14@yandex.ru

Модель сокращения саркомера [1], разработанная в институте механики МГУ, адаптирована для описания сокращения скелетных мышц. Модель учитывает, что мышечные усилия создаются миозиновыми мостиками, взаимодействующими с актиновыми нитями в миофибриллах мышц. Входом мо-

дели является скорость притока ионов кальция в мышечные клетки, которая предполагается пропорциональной потенциалу мотонейронов.

При тетаническом сокращении изменение суммарного воздействия на мышцу достаточно гладкое и представляется допустимым использование приближенной модели, полученной в результате выделения медленных движений при наличии иерархии малых параметров [2].

Для двух режимов сокращения – изометрического и изотонического – проведено сравнение с данными о реакции модели на одиночный импульс, представленными в литературе.

Предложенная модель также использована при вычислении по миографическим данным усилий мышц ног на начальном этапе движения при наклонах человека. Используются результаты обследования, при котором человек совершал наклоны за счет изменения угла в голеностопном суставе. По данным миограммы с помощью модели определялись усилия мышц голени, которые позволили вычислить зависимость угла наклона корпуса человека от времени. Проведено сравнение восстановленного по миографическим данным угла наклона с показаниями видеонализа.

Список литературы

1. Syomin F.A., Tsaturyan A.K. A simple model of cardiac muscle for multiscalesimulation: Passive mechanics, crossbridge kinetics and calcium regulation // Journal of theoretical biology. – 2017. – Vol. 420 – P. 105–116.

2. Бекеров И.Д., Влахова А.В., Кручинин П.А.. Упрощенная модель динамики сокращения скелетной мышцы // Биофизика. – 2025 – принята к опубликованию.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КОСТЕЙ ЧЕРЕПА

**Вячеслав Ладейщиков ^{1*}, Валерий Столбов ², Михаил Суханов ¹,
Илья Белков ¹, Владимир Онискив ², Александр Сотин ²**

¹Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера,
ул. Петропавловская, 26, г. Пермь, 614000, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: lvm5505@mail.ru

В клинической практике отмечается устойчивая тенденция к увеличению количества трепанаций черепа, обусловленная ростом заболевае-

мости и травматизма. В ряде случаев завершение операции сопряжено с формированием дефекта костей черепа, который в дальнейшем может провоцировать развитие посттрепанационного синдрома. Традиционно для краниопластики используется аутокость. Основным преимуществом аутотрансплантата является его биосовместимость, наличие остеоиндуктивных и остеокондуктивных свойств. К недостаткам применения аутокости следует отнести проблемы ее длительной консервации, ограниченный объем доступного материала, высокий риск развития инфекции и резорбции [1]. Углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ) является наиболее похожим по физико-механическим свойствам на аутокость материалом, который также обладает высокой прочностью, легкостью, рентгенопрозрачностью и биосовместимостью [2]. В то же время необходимо учитывать, что радиационная нагрузка, которой подвергается пациент при рентгенологических обследованиях в процессе лечения, может повлиять на прочностные свойства краниоимплантата, изготовленного из УУКМ.

Представленная работа посвящена исследованию влияния радиационного воздействия на механические свойства УУКМ. Радиационная доза облучения составляла 0/5/10/15 Мрад. Механические испытания проводились на универсальных испытательных машинах BISS Nano (UT-01-0025) и Instron 5982. Проведенные механические испытания показали, что многократное рентгеновское облучение не оказывает существенного влияния на прочностные свойства исследованного модифицированного материала.

Список литературы

1. Современные материалы для реконструкции костей свода черепа / А.А. Офицеров, Н.В. Боровкова, А.Э. Талыпов, И.Н. Пономарев // Трансплантология. – 2019. – Т. 11 (3). – С. 234–243. DOI: 10.23873/2074-0506-2019-11-3-234-243
2. The Use Carbon Composite Material For Replacement of Postresection Bone Defects / N. Belokrylov, A. Sotin, A. Belokrylov, T. Antipova // JDS. – 2023. – Vol. 5 (2). – P. 19–31. DOI: 10.33847/2686-8296.5.2_3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАМАТЕРИАЛОВ И ВЛИЯНИЕ ИХ МАКРОАРХИТЕКТУРЫ НА КИНЕТИКУ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ АНТИБИОТИКОВ

**Игорь Беспалов ¹, Рашид Шафигулин ², Никита Тугашев ¹,
Павел Большаков ³, Никита Харин ¹, Ильдар Ахтямов ²,
Оскар Саченков ¹**

¹ Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Россия

² Казанский государственный медицинский университет,
ул. Бутлерова, 49, г. Казань, 420012, Россия

³ Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева – КАИ, ул. Карла Маркса, 10, г. Казань, 420111, Россия

* e-mail: bespalovigora@gmail.com

Цель работы заключается в исследовании физико-механических и биомедицинских свойств решетчатых структур для последующего создания метаматериала, который будет являться секцией интрамедуллярного штифта.

В качестве метаматериала были выбраны три типа решетчатой структуры. Было проведено две серии натуральных экспериментов. В первой серии испытывались образцы без внедрения цемента, во второй – с внедрением. Количество выделенного антибиотика из костного цемента измерялось спектрофотометрически. Численные эксперименты проводились для пяти конечно-элементных моделей. Каждая модель характеризуется различными типами конечных элементов.

Проведенные натурные исследования показали, что образцы с внедренным цементом были минимум на 60 % жестче и на 10 % прочнее, чем образцы без цемента. Установлено, что в образцах, имеющих решетчатую структуру, количество выделенного антибиотика выше, чем в контрольной группе. Разработанная численная методика расчета напряженно-деформированного состояния решетчатых структур продемонстрировала завышенные значения результирующей реакции по сравнению с натурными испытаниями. Наиболее точное согласование с экспериментальными данными обеспечила смешанная модель, однако оптимальный баланс между точностью и вычислительными затратами достигается при использовании модели, состоящей исключительно из балочных элементов.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 г. Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и

прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ АППАРАТОВ ВНЕШНЕЙ ФИКСАЦИИ ПРИ УСТРАНЕНИИ ВАРУСНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Леонид Бионышев ^{1,2*}, Александр Сотин ², Юлия Лукина ¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии
имени Н.Н. Приорова, ул. Приорова, 10, г. Москва, 127299, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: sity-x@bk.ru

Аппараты внешней (наружной) фиксации (АНФ) стали незаменимыми в современной ортопедической практике и применяются не только при лечении переломов, но и для косметической коррекции вальгусных и варусных деформаций нижних конечностей. Использование АНФ позволяет сократить время операции и обеспечить стабильность фиксации костных фрагментов. В то же время особенности конфигурации аппарата часто вызывают дискомфорт у пациентов, затрудняют лучевую диагностику и усложняют одновременную установку аппарата на сопряженные сегменты конечности.

Инновации в области систем внешней фиксации связаны с внедрением в лечебную практику различных компоновок АНФ, адаптированных под поставленную клиническую задачу. Основной целью представленной работы явилось построение цифрового двойника АНФ Илизарова модификации Багирова и применение его для анализа влияния различных компоновок АНФ на несущую способность конструкции.

Механические испытания базовой компоновки АНФ Илизарова модификации Багирова проводились на универсальной испытательной машине Walter+Bai AG LFM-50. Построение компьютерной модели и расчет продольных деформаций АНФ с граничными условиями, соответствующими натурным испытаниям, осуществлялись с использованием про-

граммного пакета SolidWorks¹. Цифровой двойник продемонстрировал высокое соответствие натурному эксперименту и был применен для прогнозирования опорной жесткости пяти различных конструкций АНФ. Проведенные расчеты показали, что компоновки с заменой проксимальной спицы на стержень Ø6 мм или с добавлением одного стержня Ø6 мм на среднюю опору имеют более высокую продольную жесткость и могут быть рекомендованы к использованию при лечении пациентов с избыточным весом.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПОСЛЕ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

**Тимур Абляз*, Евгений Шлыков, Владимир Блохин,
Илья Осинников**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия
* e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru

В настоящее время актуальна потребность в комплексном исследовании воздействия копирувально-прошивной электроэрозионной обработки (ЭЭО) на формирование микрорельефа поверхности композитного материала, которому характерна неоднородная структура в связи со способом изготовления. Актуально исследование топографии поверхности для оценки влияния метода обработки на формирование поверхностного слоя и выявления дефектов обработки.

Проведено экспериментальное исследование микрорельефа поверхности полимерных композитных материалов нового поколения в продольном и поперечном сечениях после копирувально-прошивной электроэрозионной обработки методом лазерной конфокальной сканирующей микроскопии (ЛКСМ).

¹ Компьютерное моделирование механического поведения аппарата Илизарова модификации Багирова / Ю.С. Лукина, Л.Л. Бионьшев-Абрамов, А.В. Сотин, П.Н. Суварлы, Д.Я. Самборский, А.Н. Клокова, А.Б. Багиров // Прикладная математика и вопросы управления. – 2024. – № 4. – С. 18–33. – DOI 10.15593/2499-9873/2024.4.02

Установлено, что на поверхности образца углепластика в поперечном сечении после ЭЭО отсутствуют явно выраженные впадины и кратеры. По результатам сканирующей микроскопии установлено, что в процессе КПЭО в поперечном направлении происходит расплавление материала ПКМ с образованием равномерных лунок. При увеличении $\times 100$ на оплавленной поверхности образцов в поперечном сечении показаны участки с оптически-прозрачными, стеклоподобными включениями, сформированными предположительно в результате ускоренного охлаждения расплавленного связующего материала.

Установлено, что в продольном сечении образца после ЭЭО на поверхности имеются признаки оплавления с образованием характерных лунок. Одновременно с лункообразными элементами микрорельефа поверхности в продольном направлении образца присутствует активная волокнистая составляющая микрорельефа, доля которой относительно велика и стеклообразные, оптически-прозрачные включения.

Данное исследование показывает, что КПЭО углепластика формирует лункообразную микроструктуру поверхности с характерными особенностями в зависимости от направления обработки, что необходимо учитывать при технологическом проектировании процессов обработки данного материала.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОМЕХАНИКИ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПРОСЛОЕК

Анастасия Богданова*, Анна Каменских, Юрий Носов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия
* e-mail: anastasia_pankova@mail.ru

Антифрикционные полимерные и композиционные материалы широко применяются в качестве слоев скольжения или защитных прослоек в биомедицинских узлах трения, например при протезировании суставных систем [1]. Многие материалы используются не только в биомедицине, но и в машиностроительных системах [2]. Прогресс в материаловедении приводит к появлению новых материалов с улучшенными физико-механическими, фрикционными и термомеханическими свойствами. Времена

эксплуатации и надежность протезов суставов является важным фактором. Поэтому интересен вопрос сравнительного анализа поведения классических и современных материалов слоев скольжения или прослойки, в том числе с учетом временных факторов.

В данном исследовании рассмотрено вязкоупругое поведение антифрикционных материалов: чистый фторопласт, композит на основе фторопласта со сферическими наночастицами бронзы (МАК), композит на основе фторопласта с включением углеродных волокон («Суперфлувис SF-1»), сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) и три композита фирмы «Арфлон». Моделирование поведения материалов выполнено в рамках теории Максвелла. Для реализации использовались ряды Prony. Параметры материалов подбирались на основе результатов натурных экспериментов DMA-анализа. Анализировалось напряженно-деформированное состояние и параметры контакта слоя скольжения из разных материалов в рамках тестовых задач.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00638, <https://rscf.ru/project/25-29-00638/>.

Список литературы

1. Численное моделирование полного протеза коленного сустава с силиконовой прослойкой / А. Мааче, М. Амаджи, Х. Амеддах, Х. Мазуз // Российский журнал биомеханики. – 2024. – Т. 28, № 1. – С. 77–87.
2. Comparative analysis of the work of bridge spherical bearing at different antifriction layer locations / A.A. Adamov, A.A. Kamenskikh, A.P. Pankova, V.I. Strukova // Lubricants. – 2022. – Vol. 10, № 9. – Art. 207.

МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ТКАНИ В ВОЛНИСТОМ КАНАЛЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ СДВИГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Дмитрий Брацун*, Иван Красняков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: DABracun@pstu.ru

В последние годы тканевая инженерия стала ведущим направлением исследований в области биомедицинских наук. Развитие этой технологии

обещает радикально улучшить качество здоровья людей. Как известно, скаффолд является принципиальным элементом тканевой инженерии. Он обеспечивает подходящую механическую и химическую среду для роста и дифференциации клеток. Матрица каркаса может быть выполнена как из пористого, так и волокнистого материала. Скаффолд включается в замкнутую цепь перфузионного биореактора и заполняется питательным раствором, после чего засеваются недифференцированными клетками для развития динамической культуры.

В этой работе представлена математическую модель роста клеток в порах перфузионного биореактора, через который прокачивается жидкость. Мы разработали 2D-вершинную модель явления, которая позволяет нам воспроизводить микроскопическую динамику микроокружения клеток и описывать заполнение порового пространства. В этой модели каждая клетка представлена многоугольником; количество вершин и формы могут меняться со временем. Модель включает митотическое деление клеток и интеркаляцию. Изучается влияние двух факторов на рост клеток. С одной стороны, мы рассматриваем канал переменного сечения, который моделирует скаффолд с градиентом пористости. С другой стороны, кластер клеток растет под воздействием потока питательного раствора, который устанавливает неравномерное распределение касательных напряжений в канале. Представлены результаты численного моделирования роста ткани в волнистом канале, для которого было предварительно получено аналитическое решение для поля скорости жидкости. Модель позволяет получить данные о динамике внутриклеточного давления, локальной эластичной энергии и характеристиках клеточных популяций. Продемонстрировано, что в волнистом канале, моделирующем пору функционально-градиентного скаффолда, распределение касательных напряжений в поровом пространстве имеет сложную структуру, что подразумевает возможность управления зонами роста путем изменения геометрии пор или скорости прокачки раствора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-11-00338).

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОРИСТОГО TPMS-МАТЕРИАЛА

Дмитрий Брацун*, Рамиль Сираев, Наталия Еленская

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: DABracun@pstu.ru

Активное развитие технологий 3D-печати открывает возможности для создания персонализированных конструкций в ортопедической хирургии. В частности, инженерия костной ткани на основе высокопористых скаффолдов позволяет лечить дефекты костей с помощью имплантации. Скаффолд представляет собой пористую или волокнистую матрицу определенной структуры, засеянную недифференцированными клетками предполагаемой ткани. Он является неотъемлемой частью замкнутого контура перфузионного биореактора, обеспечивающего фильтрацию питательного раствора через поры скаффолда. Для надежной работы имплантата он должен имитировать неоднородность натуральной кости как морфологически, так и механически. Изменения локальной пористости, присущие костной ткани, можно воспроизвести в конструкциях с помощью градиента пористости. При проектировании функционально-градиентных скаффолдов одной из наиболее часто используемых элементарных ячеек являются ячейки на основе трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS).

В данной работе численно изучена гидродинамическая проницаемость пористых материалов на основе TPMS. Мы рассмотрели две популярные конструкции твердой матрицы на основе поверхности Шварца, позволяющие создавать материалы с контролируемыми градиентами пористости. Последнее свойство имеет решающее значение для регулирования поля сдвиговых напряжений в порах скаффолда, что позволяет контролировать интенсивность роста клеток. Проницаемость TPMS-матрицы изучается как в рамках микроскопического подхода, основанного на уравнении Навье – Стокса, так и усредненного описания фильтрации жидкости через пористую среду на основе уравнений моделей Дарси или Форхгеймера. Были вычислены коэффициенты проницаемости для обоих типов матриц, изучены свойства прямых и обратных потоков жидкости, определены диапазоны чисел Рейнольдса, для которых применимо описание в рамках модели Дарси или Форхгеймера. На-

конец, было получено поле касательных напряжений, которое изменяется вдоль образца, демонстрируя возможность пространственной настройки скорости роста ткани.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант № 25-11-00338).

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕПРЕССИЛЯТОРА

Максим Бузмаков*, Дмитрий Брацун

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: maxim.buzmakov97@gmail.com

Процесс математизации и создания достоверных моделей внутриклеточных процессов, наблюдаемых в рамках молекулярной биологии, начался после открытия гена, кодирующего флуоресцентный белок. Он позволяет визуально наблюдать временную и пространственную динамику белковых полей как в рамках конкретной клетки, так и целых популяций, что помогло бурному развитию синтетической биологии. Это новое направление в биологическом исследовании, направленное на создание новых организмов или модификацию существующих посредством внедрения различных генов из других живых существ. В ее основе лежит упрощение сложнейших систем взаимодействующих между собой генов и выделения небольших схем, отвечающих за конкретные функции.

Данная работа посвящена математическому моделированию процессов генной регуляции при помощи алгоритма Гиллеспи, модифицированного на случай запаздывающих реакций [1]. За основу взята одна из первых модельных синтетических цепочек – репрессилатор. Он состоит из трех генов, которые ингибируют своего соседа, создавая тем самым кольцо отрицательной обратной связи [2]. В такой конфигурации возникают квазипериодические колебания концентраций белков. В несимметричном случае при разных скоростях реакции экспрессии генов качественно изменяется характер колебаний. Благодаря взаимодействию шума и запаздывания в реакциях экспрессии генов при стохастическом моделировании в области небольшой надкритичности возникает борьба между синхрон-

ными и поочередными осцилляциями. Также стохастический подход демонстрирует более быстрый процесс первичной самонастройки.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № FSNM-2025-0001).

Список литературы

1. Брацун Д.А., Бузмаков М.Д. Репрессилатор с запаздывающей экспрессией генов Часть II. Стохастическое описание // Компьютерное исследование и моделирование. – 2021. – Т. 13, вып. 3. – 25 с.

2. Elowitz M.B., Leibler S. A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators // Nature. – 2000. – Vol. 403, № 6767. – P. 335–338.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА 3D-ПЕЧАТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ PLA И РЕЕК С РАЗНЫМ УГЛОМ ЗАПОЛНЕНИЯ

Илья Виндокуров*, Михаил Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: ivv@pstu.ru

Благодаря совершенствованию процессов и материалов аддитивное производство сегодня широко применяется в различных отраслях промышленности. Изучение деформационных характеристик 3D-печатных изделий при различных видах нагружения имеет важное практическое значение. Это позволяет оптимизировать процессы печати, повысить качество и надежность выпускаемой продукции, а также прогнозировать и управлять поведением материалов в процессе эксплуатации. Особое внимание нужно уделять коэффициенту Пуассона наряду с модулем Юнга и прочностными характеристиками, так как они входят в набор упругих параметров, необходимых для построения корректной математической модели материала. Однако на сегодняшний день исследования по определению коэффициента Пуассона 3D-печатных изделий зачастую противоречивы, что указывает на необходимость проведения дополнительных исследований.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования механических свойств образцов из полимолочной кислоты (PLA) и полиэфирэфиркетона (ПЕЭК) при растяжении, изготовленных аддитивным способом методом послойной печати в двух конфигурациях: с углом заполнения 0 и 90°. Испытания на растяжение проводились с использованием двух бесконтактных методов определения коэффициента Пуассона. Первый метод использовал систему корреляции цифровых изображений, а второй – видеоэкстензометр. Был сделан вывод, что, независимо от угла заполнения – 0 или 90 градусов, – коэффициент Пуассона не изменяется, что подтверждает тот факт, что коэффициент Пуассона – это свойство материала, а не конструкции. Кроме того, была проведена валидация двух методов определения коэффициента Пуассона. Представлены сравнительные результаты механических свойств образцов при растяжении.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2024-0013).

КОРРОЗИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ MG-1ZN-XCA В РАЗЛИЧНОМ МИКРОСТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ

Евгений Воробьев*, Юлия Гришина, Григорий Дьяконов

Уфимский университет науки и технологий,
ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, 450076, Россия

* e-mail: z.vorobyov@mail.ru

В последние годы в области биомедицинских материалов наблюдается значительный интерес к биорезорбируемым магниевым сплавам. Как известно, чистый магний обладает относительно низкими прочностными свойствами и коррозионной стойкостью. Для повышения механических и биокоррозионных свойств часто применяют легирование биосовместимыми элементами. Выбор легирующих элементов имеет большое значение, так как именно от этого зависит весь комплекс физико-химических и биомедицинских свойств.

В данной работе материалом исследования были выбраны сплавы с содержанием кальция 0,05 % (сплав 5) и 0,3 % (сплав 30). Были исследованы различные структурные состояния: сплав с литой структурой, сплав

после гомогенизации при $T = 450^{\circ}\text{C}$ с длительностью отжига 8 ч, сплав после деформационно-термической обработки (ДТО). Коррозионные испытания проводились в растворе Рингера при температуре $37 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, в течение 30 суток. Исследования структуры и механизмов коррозии проводилась в поперечном сечении исследуемых образцов после выдержки в течение 6 суток.

По результатам сканирующей электронной микроскопии видна зависимость между микроструктурой и коррозионным поведением исследуемых сплавов. В литом состоянии в сплавах наблюдается питтинговая и транскристаллитная коррозия. На 6-е сутки коррозионных испытаний потеря массы составила $21,3 \pm 2,73$ и $16,67 \pm 0,39$ % для сплавов 5 и 30 соответственно. После проведения гомогенизации в сплавах по поверхности наблюдается равномерная и питтинговая коррозия. Проведение отжига привело к уменьшению объема коррозии, что подтверждается результатами измерения потери массы: $3,7 \pm 0,31$ и $2,04 \pm 0,97$ % для сплавов 5 и 30 соответственно. В образцах после ДТО механизмы протекания коррозии схожи с литыми состояниями. Потеря массы в сплавах 5 и 30 составила $7,17 \pm 2,78$ и $3,58 \pm 0,62$ % соответственно. В работе обсуждается взаимосвязь между особенностями структурно-фазового состава сплавов и коррозионным поведением.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-79-00074. <https://rscf.ru/project/23-79-00074>.

МЕТОДИКИ НЕИНВАЗИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФРАКЦИОННОГО РЕЗЕРВА КРОВОТОКА

Тимур Гамилов^{1,2*}

¹ Институт вычислительной математики РАН, ул. Губкина, 8, Москва, 119333, Россия

² Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, г. Москва, ул. Большая Пироговская, 2, стр. 4, г. Москва, 119435, Россия

* e-mail: gamilov_t_m@staff.sechenov.ru

Золотым стандартом оценки функциональной значимости стенозов коронарных артерий является ФРК (фракционный резерв кровотока). ФРК измеряется с помощью внутрисосудистого датчика давления и представляет собой отношение среднего давления после стеноза к давлению в аорте при гиперемии (расширение периферических сосудов). В норме значение

ФРК равно 1,0. Если ФРК меньше 0,8, то принято считать, что требуется хирургическое вмешательство, например, стентирование.

Основным недостатком ФРК является необходимость использования дорогостоящего датчика и проведения хирургического вмешательства. В последние годы широкое распространение получили методы неинвазивной оценки ФРК – вычисления давления в коронарных сосудах пациента с помощью математического моделирования кровотока или искусственного интеллекта на основе снимков компьютерной томографии или коронарографии. На данный момент в мире существует ряд медицинских систем, позволяющих заменить инвазивный ФРК: HeartFlow FFR, Medis QFR, Siemens vFFR. По сравнению с инвазивным ФРК, их чувствительность и специфичность составляют от 0,8 до 0,95 при среднеквадратичном отклонении около 0,08–0,12. Подобная точность не позволяет им полностью заменить инвазивное измерение ФРК, но делает их выгодной альтернативой оценке стеноза по геометрическим данным сосуда. При этом точность этих методик не уступает так называемый негиперемическим индексам (iFR, RFR, DFR).

Разработка «Виртуальный ФРК» на данный момент является единственным российским медицинским изделием, позволяющим проводить неинвазивную оценку ФРК. Она использует одномерную модель кровотока и снимки мультиспиральной компьютерной томографии для вычисления кровяного давления в артериях пациента. На данных 64-срезовых томографов чувствительность методики составляет 0,76 и специфичность 0,86. На данный момент «Виртуальный ФРК» проходит клинические испытания.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ПРОТОТИПА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Елена Семенова, Виктория Смирнова, Олег Герасимов*

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
ул. Кремлёвская, 18, корп. 1, г. Казань, 420008, Россия

* e-mail: valeriy.karasikov@gmail.com

Исследование механических свойств неоднородных материалов выступает актуальной задачей в медицинской практике, что связано с

необходимостью определения прочности образцов биологического происхождения (костные органы) и медицинских изделий из композиционных элементов. Широкое применение получили подходы, основанные на методах неразрушающего контроля. В этом случае предполагается построение цифровых прототипов объектов, предоставляющих данные о распределении проницаемости среды в объеме. Предполагая однородность происхождения образующих материалов, оказывается возможным восстановление механических показателей в каждом микроэлементе среды. В данной работе предлагается метод численного моделирования с учетом неоднородного распределения механических свойств среды на основе модифицированного метода конечных элементов. Разработанный подход позволяет проводить расчеты на образцах неравномерной пористой структуры, а также изделий из композиционных материалов, изготавливаемых аддитивным методом. В ходе работы рассматривались тестовые модели с заданным распределением материала. Первой задачей выступало моделирование равномерной пористой структуры. Расчеты показали быструю сходимость сеточного метода при отклонении результатов менее 4 % относительно формулы смесей. Другой задачей выступало моделирование несимметричного выреза с учетом степени дискретизации области и относительного размера макроэлементов среды. Отклонение значений относительно методов прямого моделирования с учетом оптимальности времени вычислений не превышало 27 %. Погрешность результатов обуславливается неустойчивостью прямого подхода к граничным условиям. Таким образом, представленный метод позволяет проводить расчет образцов из неомогенных материалов на основе данных цифровых двойников, исключая необходимость в построении численных моделей большой размерности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00434.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТОТИПА ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННОГО ГИБРИДНОГО ПРОТЕЗА МЕЖПОЗВОНКОВОГО ДИСКА

**Никита Головкин ^{1,2*}, Олеся Никуленкова ^{1,3}, Кристина Антипова ¹,
Всеволод Побежимов ¹, Даниил Романенко ¹, Александр Несмелов ¹,
Артур Крупнин ^{1,3}**

¹ НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, г. Москва, 123182, Россия

² Московский физико-технический институт, Институтский пер., 9,
г. Долгопрудный, 141701, Россия

³ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, г. Москва, 105005, Россия

* e-mail: golovkinnikita012@gmail.com

Дегенеративно-дистрофические изменения межпозвонкового диска, сопровождающиеся хронической болью, ограничением подвижности и постепенным разрушением элементов позвоночника, являются серьезным оперативным заболеванием, лечение которого осуществляется полной или частичной заменой поврежденной ткани. В настоящее время при разработке протезов дисков находит применение 3D-печать, что обусловлено высокой точностью и возможностью создавать персонализированные имплантаты. В сочетании с имитацией интактной двухфазной структуры такой подход способствует сохранению естественного биомеханического отклика на физиологические нагрузки. Для искусственного фиброзного кольца перспективными являются конструкции на основе гироидной поверхности из биосовместимых материалов, обладающие уникальными механическими свойствами, а фантомами пульпозного ядра могут выступать гидрогели благодаря структурному сходству и вязкоупругому поведению.

В работе предложены подходы к проектированию гироидного фиброзного кольца, изготовленного с помощью экструзионной 3D-печати, реализована технология получения и контролируемого набухания гидрогеля с заданным модулем упругости для имитации пульпозного ядра. Проведены механические испытания, оценены упругогистерезисные характеристики гибридных имплантатов, показано их хорошее соответствие аналогичным характеристикам интактного диска.

Работа проведена в рамках выполнения Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

БИОСОВМЕСТИМЫЕ МАТЕРИАЛЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ГАФНИЯ ДЛЯ ИМПЛАНТАТОВ

Марина Гребенщикова*, Егор Кондратьев, Михаил Мионов

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. К. Маркса, 68, г. Казань, 420015, Россия

* e-mail: grebenschikova.marina@yandex.ru

Защитные покрытия для металлических имплантируемых конструкций предотвращают взаимодействие биологически активных сред живого организма с материалом импланта, повышая его биостойкость. Она характеризуется миграцией ионов металла в жидкие среды организма, в том числе токсических легирующих элементов титановых сплавов (например, сплава ВТ6, разработанного для аэрокосмической промышленности и применяемого в изготовлении медицинской техники), таких как ванадий, хром, молибден. Целью работы было исследование возможности получения покрытия с барьерными свойствами, обладающего антимикробностью и нулевой цитотоксичностью. Для этого проводили конденсацию многослойного покрытия на ионно-плазменной установке, формирование многослойного покрытия заключалось в последовательном непрерывном нанесении слоев из нитридов гафния и титана на подложки, расположенные на вращающейся платформе, на их поверхности последовательно конденсировалось покрытие из продуктов взаимодействия азота с металлической плазмой гафния и титана. Далее проводили активацию подложек с покрытием потоком низкоэнергетических ионов аргона и азота в высокочастотной плазменной установке. Разработано и исследовано многослойное нитридное гафний-титановое покрытие с толщиной слоев 14–25 нм и количеством 80–230 слоев. Научной основой разработки являются плазменные методы нанесения покрытий за счет конденсации наноструктурированных сверхтвердых соединений из металлической плазмы при ионном воздействии. Такие структуры, исходя из соотношения Холла – Петча, имеют повышенную механическую прочность и плотность упаковки кристаллической структуры. Использование соединений гафния повышает стойкость покрытия к средствам стерилизации в связи с высокой энтальпией образования нитрида и его инертностью. Барьерный эффект многослойного покрытия подтвержден уменьшением концентрации ванадия в 10^4 раз в экстракте от образцов титана ВТ6. Покрытия на основе нитрида гафния показали цитосовместимость с клеточными культурами. Исследования на лабораторных крысах установили отсутствие токсичности.

ческого влияния на показатели крови животных. Многослойные покрытия на основе нитридов гафния и титана с толщиной слоев 14–25 нм показали повышенные физико-механические и медико-биологические свойства, как защитные покрытия для материалов медицинских костных имплантатов.

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КАПЫ ИЗ ПОЛИАМИДА, АРМИРОВАННОГО НАНОРАЗМЕРНЫМ ДИОКСИДОМ ТИТАНА, ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ГИПЕРТОНУСОМ ЖЕВАТЕЛЬНЫХ МЫШЦ

**Виолетта Гридина ¹, Геннадий Рогожников ¹, Юлия Каракулова ¹,
Ольга Гилева ¹, Оксана Шулятникова ¹, Владислав Никитин ^{1,2}**

¹ Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера,
ул. Петропавловская, 26, г. Пермь, 614990, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: lettarus@mail.ru

В условиях хронического эмоционального стресса организм человека реагирует развитием гипертонуса жевательных мышц, одним из признаков которого является повышенная стираемость твердых тканей зубов. Повышенная мышечная активность приводит к поломке существующих зубных протезов для лечения бруксизма, обладающих как положительными функциональными характеристиками, так и рядом недостатков, таких как повышенная аллергенность, слабость к истиранию, ломкость.

Цель исследования – изучить прочностные характеристики конструкционного материала для зубных протезов, используемых для лечения бруксизма, отвечающего повышенным требованиям прочности, возникающей в ситуации гипернагрузки со стороны жевательной мускулатуры, значительно превышающей нормальные значения.

Для экспериментальной части работы были изготовлены образцы из базисного конструкционного материала, *Vertex ThermoSens (Vextex-Dental B.V., Нидерланды; ГОСТ 31571-2012; ISO 1567: 1999)* с различным содержанием наноразмерного наполнителя диоксида титана. Изучены физико-механические свойства образцов, проведено биомеханическое моделирование функциональной нагрузки на предложенную оригинальную конструкцию капы, выполненной из полиамида *Vertex ThermoSens*, армированного наноразмерным диоксидом титана.

Биомеханическое обоснование конструкции капы, выполненной из полиамидного конструкционного материала, армированного наноразмерным диоксидом титана (0, 1, 5 и 10 мас. %), проведено посредством анализа ее напряженно-деформированного состояния капы.

Результаты проведенных физико-механических и биомеханических исследований подтверждают целесообразность использования оригинальной конструкции капы из полиамида *Vertex ThermoSens*, модифицированного наноразмерным 10 мас. % диоксида титана, обеспечивающей оптимальную стабильность и прочность конструкции в процессе эксплуатации в условиях повышенных жевательных нагрузок у пациентов с генерализованной повышенной стираемостью твердых тканей зубов на фоне гипертонуса жевательных мышц. На основании биомеханических исследований нами разработана цифровая программа для ЭВМ ««Биомеханический анализ капы при бруксизме» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612214 от 19.02.2020).

О СТАНДАРТИЗАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С БИОМАТЕРИАЛАМИ

Александр Доль*, Дмитрий Иванов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Россия

* e-mail: dolav86@yandex.ru

Вопросу стандартизации процесса исследования механических характеристик различных материалов посвящено немало работ. Кроме того, существует ряд ГОСТов и международных стандартов, регламентирующих, к примеру, эксперименты по одноосному растяжению тканей или по сжатию пластиковых или стальных образцов с целью определения модулей упругости или пределов прочности. Однако для биологических материалов, несмотря на обилие описанных в литературе экспериментальных исследований, до сих пор не разработано единого стандарта исследований: ни для костных структур, ни для мягких тканей. При этом, как показывают некоторые исследователи, разное соотношение размеров образцов, к примеру, может существенно влиять на результаты экспериментов по определению модуля упругости губчатой кости.

В данной работе предпринята попытка сделать первые шаги в направлении стандартизации механических экспериментов по определению модулей упругости твердых и мягких тканей. Показано влияние геометрических параметров исследуемых образцов губчатой кости на результат, получена зависимость, позволяющая корректировать величину модуля упругости в случае «коротких» образцов, а также рассчитана минимально допустимая относительная высота образца для испытаний на одноосное сжатие кости.

Также в работе рассмотрен вопрос влияния предварительного нагружения образцов кости и влияния на результат эффекта локального разрушения на торцах, проведены серии экспериментов с различными типами накладок на торцы с целью выявления оптимальной стратегии испытаний.

Показано влияние длины образцов стенок кровеносных сосудов на результаты экспериментов по одноосному растяжению с целью определения модуля Юнга. Показана зависимость, позволяющая корректировать значение полученного модуля упругости при недостаточной относительной длине образца, а также рассчитана минимально допустимая для данного типа испытаний относительная длина.

Работа выполнена при поддержке Государственного задания (проект № FSRR-2023-0009) и Фонда Потанина (проект № ГК24-000076).

ПОРИСТЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПЕРЕДОВЫХ БИОАКТИВНЫХ ТИТАНОВЫХ ИМПЛАНТАТОВ

**Нариман Еникеев ^{1*}, Александр Рыжкин ¹, Алексей Капустин ¹,
Марина Абрамова ¹, Светлана Гатина ¹, Керям Новрузов ²,
Наталья Анисимова ^{2,3}, Михаил Киселевский ^{2,3}**

¹Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, 450076, Россия

²Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Блохина, Каширское шоссе, 24, г. Москва, 115478, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский проспект, 4, г. Москва, 119049, Россия

* e-mail: nariman.enikeev@uust.ru

Благодаря превосходной комбинации биомеханических свойств, титан и его сплавы широко используются для возмещения пораженных опухолю участков костной ткани. С развитием методов аддитивной печати были

значительно расширены возможности по проектированию персонализированных имплантируемых систем сложной формы, в том числе на основе решетчатых структур с разветвленной внутренней поверхностью сообщающихся пор различной геометрии. Такие структуры могут обеспечивать лучшее соответствие характеристик материала свойствам костной ткани, а также могут быть нагружены как клеточными продуктами, так и лекарственными препаратами с противоопухолевым или антимикробным эффектом. В рамках данного исследования образцы пористых скаффолдов с различными размерами и геометрией пор были получены методом селективного лазерного сплавления из порошка титанового сплава ВТ6. Прочностные и упругие свойства образцов определяли в ходе испытаний на сжатие, а виртуальное тестирование механического поведения осуществляли при помощи метода конечных элементов. Также оценивали их биосовместимость, влияние на адгезию, пролиферацию и остеогенную дифференцировку клеток. Установлено, что регулирование размера и топологии форм позволяет понизить «эффективный» упругий модуль метаматериала до диапазона значений, соответствующего различным костным тканям, сохраняя при этом достаточный уровень прочности. Предложенный подход по проектированию, моделированию и оценке биомеханических свойств решетчатых структур, полученных аддитивной печатью, является перспективным для разработки персонализированных биоактивных имплантатов нового поколения.

Исследование проведено при поддержке гранта РФФИ #23-69-1000.

КАНОНИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ УДАРНО-ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТОПЫ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

**Виктор Мусалимов*, Елена Седакова,
Михаил Ерофеев, Артем Кузнецов**

Институт проблем машиноведения РАН,
Большой пр. ВО, 61, г. Санкт-Петербург, 199178, Россия
* e-mail: musvm@yandex.ru

Представлены результаты анализа экспериментальных данных, полученных при исследовании трибологического (ударно-фрикционного) взаимодействия пары «стопа – опорная поверхность» на стандартной динамометрической платформе и с использованием инерциальных датчиков. Об-

наружено, что во втором случае регистрируются трехточечные импульсы в отличие от двухточечных в первом случае. Предложено моделировать ударные импульсы в базе обобщенных функций Эрмита. Одним из преимуществ этих функций является свойство локальности, заключающееся в том, что их поведение и построение на ударном сегменте не зависит от поведения и построения на других. Второе преимущество заключается в задании четной весовой функции в виде гауссиана, то есть в виде определенного нормального распределения, параметры которого физически состоятельны для их использования при анализе динамики ходьбы. В-третьих, продольные и поперечные ударно-фрикционные взаимодействия аналитически связаны через производную, что позволяет говорить о закономерной связи трения скольжения и трения вращения для пятки и носка стопы. Закономерность использована при расчете продольных ударных импульсов и моментов поперечных ударных импульсов. Переход к безразмерным переменным позволил перейти к каноническим распределениям и построить систему уравнений для продольного импульса и момента поперечного импульса. Отмечено, что в каноническом варианте функции Эрмита удовлетворяют определенному обыкновенному дифференциальному уравнению, что дает основание для его использования при моделировании динамики двуногой ходьбы с учетом сил трения. Результаты работы используются при проектировании опорных элементов ортезов голеностопных суставов и двуногих роботов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 124041500009-8).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Максим Журкевич*, Антон Калинин

Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,
ул. Я. Коласа, 24, к. 34/1, г. Минск, 220013, Республика Беларусь

* e-mail: zhurkevich@park.bntu.by

Ключевым вопросом при принятии решения о начале разработки медицинских изделий и организации их последующего производства является определение целесообразности данных действий. В настоящий момент

основные подходы к решению данного вопроса основаны на оценке экономической эффективности. При этом оценка экономической эффективности осуществляется, как правило, либо для производителя медицинских изделий, либо для медицинских учреждений, в деятельности которых данные изделия будут применяться.

Оценка экономической эффективности для производителя включает следующие основные показатели: объем производства, выручка от реализации продукции, прибыль. На основе данных показателей определяется окупаемость инвестиций. Оценка экономической эффективности для медицинских учреждений, как правило, включает показатели, отражающие сокращение затрат на оказание медицинской помощи.

Указанные показатели не учитывают социально-экономический эффект от внедрения новых медицинских изделий для национальной экономики в целом. Для определения данного эффекта могут быть использованы следующие показатели:

- сокращение потерь валового внутреннего продукта вследствие снижения уровня утраты трудоспособности за счет использования новых медицинских изделий;

- сокращение потерь налогов и сборов в связи со снижением уровня нетрудоспособности за счет использования новых медицинских изделий.

Расчет указанных показателей может быть осуществлен на основе определения выпадающих объемов производства и соответствующих им налогов, обусловленных снижением числа работников вследствие утраты трудоспособности.

Таким образом, определение социально-экономического эффекта должно являться неотъемлемой составляющей при определении экономической эффективности разработки медицинских изделий. Кроме того, определение социально-экономического эффекта является особо актуальным при разработке принципиально новых видов медицинских изделий, что может сопровождаться созданием крупных производственных комплексов.

АДАПТАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА КОСТНЫХ СКАФФОЛДОВ ПРИ СЖАТИИ С ПОМОЩЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ИХ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ

**Вера Затонская, Наталия Еленская*, Евгений Кононов,
Михаил Ташкинов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: n.elenskaya@pstu.ru

Восстановление костной ткани позволяет минимизировать риск тяжелых осложнений, таких как деформация конечностей и нарушение двигательных функций. Современные биотехнологии, включая 3D-печать и методы биоинженерии, предоставляют инновационные подходы к разработке композитных материалов и имплантатов для эффективного замещения или регенерации костных структур. Цель исследования – оптимизация механических свойств внутренней архитектуры скаффолдов на основе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП) за счет контроля морфологических параметров, с последующим сравнением полученных данных с референтными параметрами трабекулярной костной ткани.

Были разработаны скаффолды с оптимизированным механическим откликом, приближенным к характеристикам референтного фрагмента костной ткани. Оптимизация достигнута за счет управления внутренними параметрами архитектуры ТПМП и регулирования пространственной ориентации элементарной ячейки. Проведен анализ соответствия разработанных структур ключевым требованиям к архитектуре скаффолдов, включая потенциальные биологические свойства (пористость). Механические характеристики структур исследованы на основе эффективного упругого отклика при сжимающих нагрузках в трех ортогональных направлениях, степени анизотропии и распределения напряжений по объему спроектированных скаффолдов.

В результате численного моделирования была разработана структура, эффективный упругий модуль и распределение напряжений по объему которой максимально приближены к свойствам референтного фрагмента костной ткани.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-11-00338).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АППАРАТА ИЛИЗАРОВА ПОД НАГРУЗКОЙ: СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ANSYS И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Владимир Зубцов*, Юлия Лукина, Арчил Цискарашвили

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии
имени Н.Н. Приорова, ул. Приорова, 10, г. Москва, 127299, Россия

* e-mail: zubtsov@gmail.com

Основным преимуществом внешней фиксации костей является возможность стабилизировать перелом или остеотомию без применения инвазивной хирургии, которая часто нежелательна при травмах. По сравнению с методами внутренней фиксации внешняя фиксация позволяет минимизировать повреждение мягких тканей и обеспечивает гибкость в выборе точек для размещения спиц и штифтов с учетом анатомических ограничений. Различные компоновки аппаратов наружной фиксации могут влиять на уровни деформации при физиологической нагрузке¹.

Цель работы – провести сравнительный анализ деформационного поведения двух компоновок аппарата Илизарова под нагрузкой на основе данных физико-механических испытаний и результатов численного моделирования (в программном комплексе ANSYS Workbench).

Методика экспериментальных исследований: на универсальной испытательной машине Walter+Bai AG LFM-50 проведены экспериментальные исследования механического поведения аппаратов Илизарова двух компоновок, используемых для лечения костных дефектов в диафизарном отделе голени. Четырехуровневая компоновка кольцевого спицевого и стержневого аппаратов подвергалась осевым (вдоль продольной оси «кости») нагрузкам до 1 кН, приложенным квазистатическим образом. Во время испытаний непрерывно регистрировались перемещения вдоль оси z и сила нагружения.

Методология моделирования: создана параметрическая конечно-элементная модель аппаратов Илизарова в ANSYS, включая кольца, спицы, стержни и соединительные узлы. Исследовано механическое поведение аппарата при нагрузках, соответствующих клинической практике.

¹ Цискарашвили А.В., Дудченко А.В. Анализ основных элементов фиксации аппарата для внешнего остеосинтеза // Российский журнал биомеханики. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 435–450.

Результаты сравнения: выявлено высокое соответствие между данными компьютерного моделирования и экспериментальными измерениями, что подтверждает адекватность используемой конечно-элементной модели. Интеграция численных методов с экспериментальной проверкой открывает возможности для дальнейших исследований и совершенствования компоновок внешних фиксирующих систем.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЗВОНКОВ ПО КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАММЕ

**Татьяна Нефедова, Дмитрий Сидоренко,
Александр Доль, Дмитрий Иванов***

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,
ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Россия
* e-mail: ivanovdv.84@ya.ru

Остеопороз является одним из наиболее распространенных заболеваний костной ткани, приводящим к снижению ее минеральной плотности. Надежным методом диагностики остеопороза является компьютерная томография (КТ). Однако различные модели компьютерных томографов и используемые ими сверточные ядра могут давать различные значения единиц Хаунсфилда (НУ). Это может влиять на точность прогнозирования стабильности фиксирующих конструкций при планировании операций, так как в биомеханическом моделировании именно НУ используются для расчета индивидуальных механических и прочностных свойств кости

В данном исследовании оценено влияние различных сверточных ядер на определение НУ и, как следствие, на напряженно-деформированное состояние фиксирующих конструкций и губчатой кости позвонков. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Оценка НУ на основе данных КТ, полученных с использованием различных сверточных ядер.
2. Построение и валидация 3D-модели поясничного сегмента позвоночника.
3. Анализ влияния различных значений НУ на механические свойства кости и стабильность фиксирующих конструкций.

При решении статической задачи биомеханики о напряженно-деформированном состоянии поясничного сегмента позвоночника типовыми нагрузками выявлено, что наибольшие напряжения в губчатой кости при различных движениях тела могут отличаться на 35 % в зависимости от серии снимков КТ, которые были использованы для расчета свойств кости. При этом для напряжений в винтах и кортикальной кости такой зависимости выявлено не было. Таким образом, может возникнуть проблема оценке риска повреждения губчатой кости при пациент-ориентированном моделировании. Не очевидно, какую серию снимков брать для расчета индивидуального модуля упругости кости. Этот вопрос требует проведения дополнительных исследований.

Исследование выполнено при поддержке Государственного задания (проект FSRR-2023-0009).

ЭФФЕКТИВНЫЕ УПРУГИЕ СВОЙСТВА БИОПОЛИМЕРНЫХ СКАФФОЛДОВ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Евгения Ильина, Павел Королёв, Леонид Маслов*

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, 153003, Россия

* e-mail: leonid-maslov@mail.ru

Благодаря регулярно обновляемым медицинским отчетам AM3D Printing, публикующимся в ASME, видно, что аддитивное производство является одной из активно развивающихся тенденций в медицине. При более детальном изучении пористых скаффолдов, предназначенных для лечения сегментарных костных переломов, можно сделать вывод, что главными параметрами при изготовлении имплантатов являются материал и геометрия внутренней структуры.

Материалы, используемые при создании скаффолдов, должны обеспечивать их успешное вживление и обладать необходимыми механическими свойствами. Среди таких материалов передовыми являются биополимеры и метабиоматериалы. Это химические соединения и конструкционные материалы с уникальными свойствами, происходящими от их конструкции внутренней структуры, которые соответствуют основным требованиям биосовместимости: химическая стойкость; способность выдерживать стерилизацию; минималь-

ные риски возникновения инфекций; биodeградируемость, обеспечивающая разложение материала под воздействием биологических факторов. Геометрия скаффолдов, в свою очередь, должна искусно имитировать структуру замещающей биологической ткани и обеспечивать необходимые механические свойства замещающего скаффолда. Стремясь создать пористую структуру, изменением морфометрических характеристик которой можно было бы управлять, инженеры пришли к методам проектирования геометрии на основе трижды периодических минимальных поверхностей.

Принимая во внимание данные факторы, для исследования механических свойств скаффолда было выбрано заполнение пористого объема различными типами решеток, обеспечивающих разные проценты пористости. Для единичных ячеек из данных решеток численными экспериментами определены упругие эффективные характеристики. Для аддитивного изготовления образцов скаффолдов различной формы выбраны экологичные биodeградируемые материалы, таких как PLA, и модели 3D-принтеров, работающие с био- и фотобиополимерами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20118, <https://rscf.ru/project/25-21-20118>.

УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Наталья Казанцева ^{1*}, Максим Ильиных ¹, Виктор Кузнецов ^{2,3},
Юлия Козмец ¹, Максим Карабаналов ²**

¹ Институт физики металлов УрО РАН имени М.Н. Михеева,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

² Уральский федеральный университет имени Первого президента России Б.Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

³ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии
имени академика Г.А. Илизарова, ул. Ульяновой, 6, г. Курган, 640014, Россия

* e-mail: Kazantseva-11@mail.ru

В докладе представлены результаты исследования влияния конструкции имплантата и конструктивных факторов на усталостную долговечность при циклическом нагружении. Имплантаты были изготовлены из порошка стали

316L медицинского назначения с использованием электронно-лучевого 3D-принтера. С помощью программного обеспечения ANSYS была построена имитационная модель деформации имплантата. Полученные данные показали, что геометрия имплантата имеет необходимый запас прочности по времени остеоинтеграции. Установлено, что коэффициент концентрации напряжений, связанный с усталостной долговечностью, для имплантата с шестигранной головкой и внутренней резьбой зависит от механических свойств металла, конструкции и условий нагрузки. Наличие внутренней резьбы и отверстий в имплантате увеличивает коэффициент концентрации напряжений более чем в 10 раз. Расчет показал, что количество циклов нагрузки до отказа имплантата, рассчитанное с учетом коэффициента снижения предела выносливости, оказалось достаточным для остеоинтеграции имплантата. Полученные данные анализируются и обсуждаются.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ В ЖЕЛУДКЕ И ДУОДЕНУМЕ: ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОТОРИКИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПИЩЕВОЙ НАГРУЗКЕ

Марат Камалтдинов^{1,2*}

¹ Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, ул. Монастырская, 82, г. Пермь, 614045, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: kmr@fcrisk.ru

В последние 5–10 лет исследования в области моделирования течения в желудке и кишечнике активно развиваются, в период 2023–2025 гг. опубликовано сразу несколько обзорных статей по этой проблематике коллективов из Китая, США, Австралии и Новой Зеландии. Сравнительно мало работ посвящено многофазному моделированию, при этом не учитываются межфазный обмен, процесс эвакуации пищи из желудка в кишечник, крайне редко рассматриваются особенности пищеварительных процессов при наличии патологии, в численных экспериментах используются параметры моторики

тракта, полученные в натурных экспериментах при нагрузке желудка водой, а не реальной пищей, при этом параметры полагаются постоянными во времени. Целью представленной работы является получение параметров моторики желудка при различной пищевой нагрузке на основе ультразвуковых исследований. Рассмотрен порядок проведения натурального эксперимента, а также некоторые полученные зависимости параметров моторики (период полувыведения пищи из желудка, амплитуда, период, скорость перистальтической волны в антруме, период открытия и диаметр пилорического сфинктера) от состава принятой пищи и времени. Результаты натурального эксперимента (индивидуальные параметры формы и моторики желудка, состав пищи) использованы в численных экспериментах для прогнозирования характеристик многофазного течения пищи на основе разработанной ранее математической модели (П.В. Трусов, Н.В. Зайцева, М.Р. Камалудинов и др., 2012–2024 гг.), в том числе для определения зон повышенной кислотности как основного фактора повреждения слизистого покрова.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2025-0001).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ И КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРАМИ

**Иван Каманцев ^{1*}, Антон Голоднов ², Марина Сухова ¹,
Сергей Беликов ², Даниил Лазарев ^{1, 2}**

¹ Институт машиноведения УрО РАН имени Э.С. Горкунова,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620049, Россия

* e-mail: trophyland@mail.ru

В настоящее время широкое распространение получают изделия и элементы конструкций, изготовленные с помощью аддитивного производства [1]. Отличительной особенностью таких изделий является их крайне развитая архитектура и невозможность получения таких изделий традиционными методами [2]. Установлено, что при построении изделий из металлов методом 3D-печати существуют как минимум два конкурирующих процесса:

разрушение изделий, связанное с особенностью синтеза исследуемого класса материалов в процессе печати, и разрушение изделий в зависимости от геометрического строения [3]. Геометрические особенности строения и особенности формирования микроструктуры открывают большие возможности для создания заданного комплекса механических свойств. Одной из исключительных особенностей является возможность использовать принцип биоподобия. В данной работе рассмотрены структуры, прототипами которых являются биологические объекты: пчелиные соты и скелет морской губки *Aphrocallistes* spp. Оценка влияния дефектов искусственного происхождения в строении сетчатой конструкции позволила установить чувствительность обеих типов ячеистых структур к концентраторам напряжений. Показано, что чувствительность к дефектам у образцов с периодическим строением существенно выше, чем с квазипериодическим строением.

Список литературы

1. Maconachie T. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges // Materials & Design. – 2019. – № 183. – P. 28–39.
2. Tang Y., Kurtz A., Dong Zhao Y.F. Lattice structure design and optimization with additive manufacturing constraints // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2017. – № 15. – P. 156–1562.
3. Fracture behavior of Ti-6-4 cellular structures obtained by selective laser melting / I.S. Kamantsev, N. Yu. Loginov, S.V. Belikov [et al.] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2020. – № 4. – P. 35–47.

ВЯЗКОУПРУГОСТЬ И РЭТЧЕТИНГ ПОЛИЛАКТИДА

**Илья Келлер^{1,2*}, Илья Виндокуров², Анатолий Адамов¹,
Наталия Еленская², Михаил Ташкинов²**

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН,
ул. Академика Королёва, 1., г. Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: kie@icmm.ru

Полилактид, как и многие полимеры, при различных режимах нагружения демонстрирует вязкоупругие и вязкопластические свойства, что может сказываться на эксплуатационных характеристиках изделий

из него. При этом данный материал пользуется высоким спросом в биомедицинском инжиниринге благодаря таким свойствам, как биосовместимость и биodeградация. В связи с этим, актуально не только понимание, какой механический отклик возникнет в материале при статическом и циклическом нагружении, но и умение спрогнозировать отклик конструкции из него с помощью математической модели.

В рамках данной работы над сплошными цилиндрическими образцами проводились два типа испытаний: на стесненное статическое сжатие и на свободное сжатие – квазистатическое и циклическое. Результаты испытания на стесненное сжатие не обнаруживают статистически значимую зависимость от скорости деформации и характеризуются весьма узкими петлями гистерезиса, позволяющими считать объемное изменение упругим. Кривые монотонного нагружения демонстрируют неупругую составляющую при превышении напряжений 45 МПа. Неупругая составляющая демонстрирует вязкопластическую реологию. Результаты испытания при циклическом деформировании со скоростью перемещения траверсы 3 мм/мин и ступенчатым ростом амплитуды напряжения с выдержками обнаруживают вязкоупругие свойства материала, которые проявляются в виде заметной релаксации при выдержках после нагружения с амплитудами 50 и 60 МПа. Полилактид при асимметричном одноосном циклическом деформировании накапливает вязкопластическую сжимающую деформацию, рост которой зависит от амплитуды напряжения. Величина накопленной вязкопластической деформации непропорционально растет с ростом амплитуды напряжения и убывает с ростом скорости деформирования. При этом значение накопленной вязкопластической деформации в первом цикле гораздо больше, чем во всех последующих. Для описания полученных экспериментальных данных была разработана модель вязкоупругопластичности. Полученные результаты будут актуальны для решения задач прогнозирования механического отклика биомедицинских объектов из полилактида в условиях, приближенных к эксплуатационным.

ФОРМИРОВАНИЕ СТЕНТОВ НА ОСНОВЕ СОСР И TiNi СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ

Полина Килина*, Андрей Дроздов, Алексей Кучумов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: kilinapn@mail.ru

Благодаря методу аддитивного производства, такому как селективное лазерное сплавление, появилась возможность изготовить персонализированные медицинские конструкции любой конфигурации. Целью работы является селективное лазерное сплавление коронарных стентов, исследование параметров макрогеометрии и микропористости.

Для анализа исходного порошка и полученных изделий использован растровый электронный микроскоп COXEM EM-30AXPlus, оптический микроскоп Olympus GX51, спектрометр EDX-800HS (Shimadzu), микрофокусный томограф XT H 225 ST, анализатор размера частиц Analysette 22 NanoTec (Fritsch). Получение сетчатых образцов осуществлялось на установке Realizer SLM 50. Для сплавления порошковых материалов на основе CoCr и TiNi использовались 5 видов разработанных в программном пакете NX параметрических 3D-моделей стентов. По результатам факторного эксперимента были выявлены рациональные режимы сплавления. В процессе моделирования в системе ANSYS Additive Print с учетом перемещений была создана компенсирующая геометрия стента, которая позволяет минимизировать линейные деформации. В результате численных и экспериментальных исследований установлено, что минимальная микропористость перемычек, составляющая 0,01–0,05 % в продольном и поперечном направлении в сочетании с минимальными отклонениями геометрических размеров от 3D-модели порядка $\Delta = 0,01$ мм достигается для порошка CoCr при мощности $P = 40$ Вт, значении объемной плотности энергии $0,8$ Дж/мм³, для порошка TiNi при мощности $P = 37,5$ Вт, при значении объемной плотности энергии $0,17$ Дж/мм³.

Теоретически и экспериментально доказана возможность изготовления персонифицированных сетчатых конструкций с диаметрами от 2 мм. Перемычки с размерами от 100 мкм характеризуются гибкостью и стабильностью размеров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01284, <https://rscf.ru/project/23-79-01284/>.

ПОЛУЧЕНИЕ СКАФФОЛДОВ С МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА МЕТОДАМИ 3D-ПЕЧАТИ И ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

**Никита Князев ^{1*}, Александр Хмелевский ^{1,2}, Всеволод Побежимов ¹,
Петр Дмитриakov ¹, Сергей Малахов ¹, Артур Круппнин ^{1,3}**

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
пл. Академика Курчатова, 1, г. Москва, 123182, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет), Институтский переулок, 9, г. Долгопрудный, 115184, Россия

³ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, г. Москва, 105005, Россия

* e-mail: knyazev.200013@gmail.com

Разработка биоразлагаемых клеточных каркасов-скаффолдов является одним из ключевых направлений современной тканевой инженерии. Одним из наиболее популярных полимеров для их получения является полилактид – биосовместимый полиэфир, способный к контролируемой биodeградации и обладающий механическими свойствами, сопоставимыми с рядом нативных тканей организма.

Особое внимание уделяется пористой структуре скаффолдов, необходимой для пролиферации клеток и транспорта веществ, а также оказывающей влияние на механические свойства изделий и кинетику их биodeградации. Применение 3D-печати позволяет получать персонализированные клеточные каркасы со сложной геометрией, однако данный метод ограничен в возможности достижения необходимой микропористой структурой.

В данном исследовании рассматривается технология получения трехмерных скаффолдов на основе полилактида с иерархической пористостью комбинированием методов 3D-печати и выщелачивания биосовместимых порообразующих агентов. В рамках работы изучено влияние концентрации порога на морфологические и физико-химические свойства искусственных клеточных каркасов.

Работа проведена в рамках выполнения Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

РАЗРАБОТКА ДИЗАЙНА СПИНАЛЬНОГО КЕЙДЖА НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА С КОНТРОЛИРУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Марина Козик*, Владислав Львов, Фёдор Сенатов,
Александр Левин

Университет науки и технологий «МИССИС», Ленинский пр-т., 4, г. Москва, 119049, Россия

* e-mail: marinakozik627@gmail.com

Спинальный кейдж с пористой структурой в объеме обладает механическими свойствами, близкими к свойствам костной ткани, что увеличивает его срок службы. В качестве пористой структуры перспективным является использование ауксетиков.

Ауксетики снижают жесткость изделия без потери стабильности благодаря повышенным квазистатическим и усталостным характеристикам по сравнению с другими пористыми структурами. Механические характеристики ауксетиков достигаются за счет контролируемой пористости и особой формы элементарной ячейки.

Основная цель исследования – разработка автоматизированного метода проектирования пористых структур и исследование связи между их геометрическими параметрами, пористостью и размером пор, а также механическими свойствами ауксетической структуры, полученной с помощью 3D-печати с использованием технологии селективного лазерного спекания.

Определение необходимых параметров ауксетика осуществляется с использованием оригинальной математической модели *Aux.com*, которая функционирует на основе метода полного перебора (*Brute Force*). Разработанная модель, используя аналитические формулы пористости и размера пор, автоматически перебирает все возможные геометрические параметры в рамках заданных условий и выводит соответствующие значения пользователю для дальнейшего проектирования и исследования элементарной ячейки.

Результаты сходимости математической модели демонстрируют отклонение 5 %. Значения пористости экспериментальных образцов 74–81 %, размером пор от 740 до 1000 мкм, что соответствует свойствам нативной ткани (пористость: 50–80 % и размер пор: 600–1500 мкм). Механические характеристики ауксетической структуры ($E = 1,5\text{--}2,5$ ГПа) близки к механическим характеристикам губчатой кости ($E = 1,37\text{--}2$ ГПа). Полученные данные демонстрируют перспективы использования математической мо-

дели для расчета параметров элементарных ячеек с последующим применением в медицинских изделиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Стратегического проекта «Биомедицинские материалы и биоинженерия» (Приоритет 2030).

ЦИФРОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА БАЗЕ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Никита Кондратьев*, Кирилл Остапович, Матвей Балдин,
Андрей Подседерцев, Алексей Швейкин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: kondratevns@mail.ru

Современные требования к эксплуатационным качествам конструкций обуславливают необходимость применения материалов, свойства которых наилучшим образом соответствуют условиям функционирования изделий. Макроскопические характеристики металлов и сплавов определяются состоянием структуры на нижележащих масштабных уровнях, в связи с чем актуальным является проектирование создания функциональных материалов-изделий – со структурой, оптимизированной под конкретные условия эксплуатации.

Разработанная методика цифрового проектирования предполагает реализацию связанных этапов: 1) моделирование эксплуатации изделия для определения оптимальных свойств и отвечающих им наборов значений параметров структуры материала; 2) моделирование технологических процессов с поиском их режимов, обеспечивающих формирование необходимых значений параметров структуры. В основу методики функционального проектирования положены многоуровневые модели материалов, позволяющие исследовать отклик на воздействия в зависимости от состояния материальной структуры. В работе рассматривается ее применение для объектов в области биомеханики на примере миниатюрных коронарных стентов. Разработана многоуровневая модель механического поведения

материала стента с учетом размерного эффекта, с применением которой исследованы наиболее типичные условия его эксплуатации, определены параметры структуры, позволяющие достигать лучших эффективных свойств конструкции стента в условиях функционирования, сформированы предположения по режимам изготовления таких изделий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ В ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Полина Корягина*, Михаил Ташкинов, Наталия Еленская

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: polinak@pstu.ru

Пористые биodeградируемые материалы на основе полимолочной кислоты (PLA) активно применяются в тканевой инженерии для временных имплантатов и скаффолдов. Однако при длительном нахождении в биосреде их механические свойства существенно изменяются из-за процессов биodeградации. Целью настоящей работы является моделирование изменений механических характеристик PLA-структур с геометрией на основе трижды периодических минимальных поверхностей (Gyroid) с учетом зависимости модуля Юнга от молярной массы и времени.

Для численного моделирования в расчетной модели учитывались: пространственно-неоднородное распределение молярной массы, связь между молекулярной деградацией и снижением модуля упругости. Особое внимание уделено гетерогенной деградации, приводящей к более интенсивному разрушению центральных зон структуры по сравнению с поверхностными слоями. Численный расчет показал, что изменение молярной массы с течением времени не линейно и замедляется примерно после

4-й недели, а также, что за первые 8 недель ячейка теряет ~65 % исходной молярной массы.

Изменение молярной массы с течением времени не линейно и замедляется примерно после 4-й недели. Выявлено, что за первые 8 недель ячейка потеряет ~65 % исходной молярной массы. Исследование механического поведения показало, что уже спустя неделю модуль снижается на ~15 %, а к 4-й неделе достигает ≈ 900 МПа, то есть теряет около 40 % первоначальной жесткости. Кривая имеет ярко выраженную вогнутую форму: скорость убывания модуля Юнга максимальна в начальной фазе.

Полученные результаты демонстрируют, что при неизменной внешней нагрузке в процессе деградации происходит рост локальных напряжений, особенно в ослабленных участках. Это подтверждает необходимость учета не только временного, но и пространственного хода деградации при проектировании биоразлагаемых имплантатов. Разработанная модель может служить основой для оптимизации геометрии и предсказания ресурса работы таких конструкций в биологических условиях.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ СЛС-ОБРАЗЦОВ ИЗ Ti-6Al-4V ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ НА ИЗГИБ

Юлия Козмец*, Наталия Казанцева, Игорь Ежов, Денис Давыдов

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

* e-mail: y.koemets@imp.uran.ru

Титановый сплав Ti-6Al-4V сочетает в себе такие свойства, как высокая прочность, пластичность и биосовместимость, что обеспечивает его широкое применение в медицинской промышленности. Винты и имплантаты в процессе эксплуатации в организме подвергаются циклическим многоосным нагрузкам – сжатие, растяжение, изгиб. Исследования характеристик сплава Ti-6Al-4V выявили, что материал, изготовленный методом селективного лазерного спекания (СЛС), демонстрирует более низкую усталостную прочность по сравнению с промышленными аналогами при одинаковых циклических нагрузках. Основной причиной этого является дефектность СЛС-образцов – пористость и шероховатость, служащие кон-

центраторами напряжений и ускоряющими рост трещин под воздействием циклических нагружений, значительно снижая тем самым количество циклов деформации до разрушения (N_f). Таким образом, актуально более глубокое изучение механизмов усталостного разрушения слоистых СЛС-образцов на изгиб. Целью данной работы является комплексный анализ механизмов усталостного разрушения СЛС образцов из сплава Ti-6Al-4V медицинского назначения при испытаниях на трехточечный изгиб при комнатной температуре.

В данной работе были изучены СЛС-образцы Ti-6Al-4V и промышленного производства после циклических испытаний на трехточечный изгиб. Микроструктурные исследования проводились с использованием растрового электронного микроскопа Tescan MIRA LMS, микротвердость была измерена на микротвердомере «Метолаб».

В результате исследования структуры установлено, что при изгибе в образцах возникает локальная нестабильная пластическая деформация при напряжениях, которые меньше предела текучести материала. Обнаружено увеличение внутренней пористости и конгломерации пор в слоистом материале в зоне разрушения. Выявлена зависимость влияния внутренних дефектов на процесс усталостного разрушения при циклических нагрузках в промышленных и СЛС образцах из сплава Ti-6Al-4V.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

**Никита Кропанев*, Анна Каменских, Александр Горохов,
Тимур Абляз, Евгений Шлыков**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: cropanew.nikita2016@yandex.ru

Процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО) нашел широкое применение в биомедицине в рамках создания уникальной функциональной морфологии поверхности биомедицинских изделий с учетом трибологии

[1; 2]. Формирование требуемого качества морфологии поверхности материалов распространено в имплантологии и направлено на увеличение темпов вживления материала в естественные органические структуры [2]. Итоговый результат технологического процесса ЭО можно предсказать, а также оценить влияние структуры материала на поведение конструкций в рамках цифровых моделей. Развитие математических моделей процесса ЭО включает постепенный учет физико-механических явлений в численных алгоритмах для минимизации погрешности модели и на настоящий момент находится на стадии активного развития.

В рамках данной работы выполнен учет пластического течения материала в процессе ЭО при единичном импульсе и серии импульсов. Выполнено сравнение данных с результатами моделирования в рамках термупругой постановки. Построены зависимости формообразование лунки от входных параметров модели в рамках моделирования единичного импульса и анализ изменения морфологии поверхности при действии серии импульсов. Осуществлена оценка пластического течения материала в рамках процесса ЭО и его влияние на формирование поверхностной структуры металлической заготовки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01224 <https://rscf.ru/project/23-79-01224/>.

Список литературы

1. Recent Trends and Developments in the Electrical Discharge Machining Industry: A Review / A.A. Kamenskikh, K.R. Muratov, E.S. Shlykov, S.S. Sidhu, A. Mahajan, Y.S. Kuznetsova, T.R. Ablyaz // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – Vol. 7, no. 6. – Art. 204.
2. Mahajan A., Devgan S., Sidhu S.S. Surface alteration of biomedical alloys by electrical discharge treatment for enhancing the electrochemical corrosion, tribological and biological performances // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Vol. 405. – Art. 126583.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРИСТЫХ ГИРОИДНЫХ ОБРАЗЦОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА МЕТОДОМ ЭКСТРУЗИОННОЙ 3D-ПЕЧАТИ

**Артур Крупнин ^{1,2*}, Олеся Никуленкова ², Всеволод Побежимов ¹,
Даниил Романенко ¹, Александр Несмелов ¹, Федор Сорокин ²**

¹ НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, 105005, Россия

* e-mail: artkrupnin@gmail.com

Пористые, в том числе гироидные, структуры, производимые методом экструзионной 3D-печати, представляют значительный интерес для тканевой инженерии, регенеративной медицины и инженерных приложений благодаря сочетанию уникальных механических, биологических и функциональных свойств. Такие структуры, характеризующиеся биоподобной архитектурой, высокими удельной прочностью и пористостью, обеспечивают оптимальные условия для адгезии, пролиферации и дифференцировки клеток, а также эффективного транспорта питательных веществ и метаболитов. Использование полимерных материалов позволяет контролировать параметры изделия, адаптируя его под конкретные задачи – от регенерации костной ткани, где гироидные структуры имитируют трабекулярную архитектуру, до разработки легких и прочных энергопоглощающих элементов в аэрокосмической и автомобильной промышленности.

В работе проведено расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния пористых гироидных образцов, изготовленных из полилактида методом экструзионной 3D-печати. В условиях натурального и численного экспериментов в широких диапазонах значений пористости исследованы механические характеристики. Построено семейство кривых Гибсон – Эшби для эффективных значений модуля упругости и предела текучести в диапазоне значений пористости от 50 до 83 %.

Работа проведена в рамках выполнения Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

О МОДЕЛИРОВАНИИ УДЕРЖАНИЯ ЧЕЛОВЕКОМ РАВНОВЕСИЯ ПРИ ФРОНТАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ КАЧЕЛЕЙ SEESAW

Павел Кручинин*, Надежда Алексеева

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991, Россия

* e-mail: pkruch@mech.math.msu.ru

Описана математическая модель для анализа регуляции позы человека, в условиях удержания равновесия на подвижном основании в виде качелей seesaw (балансирной доске). Seesaw представляет собой сегмент цилиндра, контактирующий с горизонтальной поверхностью и совершающий движение без проскальзывания. Такой тест используется в биомеханике и спортивной медицине. В модели учитываются управляющие моменты в суставах конечностей, позволяющие сохранять вертикальную позу. Подобные модели ранее строились для описания удержания человеком равновесия при движении в сагиттальной плоскости [1; 2]. Исследование посвящено задаче удержания равновесия при фронтальной ориентации человека на seesaw.

Обсуждается использование математической модели для оценки влияния параметров seesaw на сложность выполнения упражнений по удержанию равновесия. Для оценки степени сложности выполнения предлагается использовать размер области управляемости линеаризованной модели движения при ограничении величины управляющего момента.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. Гугаев К.В., Кручинин П.А., Формальский А.М. Модель удержания человеком равновесия на подвижной опоре в виде пресс-папье // Прикладная математика и механика. – 2016. – Т. 80, № 4. – С. 450–460.
2. Формальский А.М., Кручинин П.А., Войцицкая К.Л. Стабилизация двойного перевернутого маятника, установленного на качелях seesaw // Прикладная математика и механика. – 2021. – Т. 85, № 6. – С. 683–698.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА УПРАВЛЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО 3D-ПРИНТЕРА С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

**Арина Кузьмина ^{1,2*}, Наталия Казанцева ¹, Асия Байкузина ^{1,2},
Николай Сахаров ^{1,2}, Игорь Ежов ¹**

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

² Уральский федеральный университет имени Первого президента России Б.Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620062, Россия

* e-mail: kuzari02@yandex.ru

Выбор режима печати с помощью лазерного 3D-принтера зависит от большого количества технологических параметров, большая часть из которых predetermined фирмой-изготовителем. В качестве управляемых параметров, предлагаемых оператору для изготовления изделия, можно назвать следующие: скорость сканирования лазера и его мощность, толщина слоя металлического порошка, схема сканирования, расстояние между лазерными треками. Это обуславливает отсутствие универсального режима для качественной печати из одного и того же металлического порошка с помощью разных лазерных 3D-принтеров. Таким образом, необходимо нахождение некоторого диапазона управляемых параметров 3D-печати, соответствующих высокому качеству готового изделия. Целью данной работы является определение диапазона управляемых параметров лазерного 3D-принтера, обеспечивающего высокое качество изделий сложной формы.

В данной работе исследовали серию титановых образцов (40 штук), изготовленных методом селективного лазерного сплавления (СЛС), с различными режимами 3D-печати. Микроструктурные исследования проводили с использованием растрового электронного микроскопа Tescan MIRA LMS. Относительную плотность образцов определяли методом Архимеда с помощью аналитических весов OHAUS. Микротвердость измеряли по Викерсу на микротвердомере «Метолаб 502».

В результате определены допустимые диапазоны параметров (мощность, скорость сканирования, схема сканирования, ширина между лазерными треками), обеспечивающие высокую плотность и микротвердость СЛС образцов. С помощью выбранного оптимального режима печати получен канюлированный винт из порошка Ti-6Al-4V. Проведено исследование структуры и микротвердости различных участков СЛС винта.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И БИОСОВМЕСТИМОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МОРСКОГО КОЛЛАГЕНА

Юлия Куликова*, Ольга Бабич, Станислав Сухих

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
ул. А. Невского, 14, г. Калининград, 236039, Россия

* e-mail: kulikova.pnpu@gmail.com

В настоящее время все большую популярность набирает персонализированная медицина, предполагающая использование аддитивных технологий для создания органов и тканей. Благодаря своему химическому составу и структуре коллаген может быть рассмотрен в качестве перспективного биоматериала для тканевой инженерии и включения в рецептуру чернил для 3D-биопечати. В работе проведен сравнительный анализ механических свойств изделий из коллагена, полученного из медуз *Aurelia aurita* и *Rhopilema hispidum*, обитающих в разных температурных условиях.

К материалам для создания 3D-каркасов для замены утраченных органов и тканей предъявляют определенные требования по биосовместимости, биоактивности, которые также были изучены в данном исследовании. Результаты механических свойств коллагеновых мембран из двух исследованных медуз показали, что предел прочности мембран толщиной 0,22 мм в сухом состоянии составил от $0,54 \pm 0,09$ до $0,60 \pm 0,08$ МПа, при увлажнении физиологическим раствором предел прочности снижался до $0,11 \pm 0,02$ – $0,22 \pm 0,03$ МПа, модуль упругости пленок также был невысок – на уровне $3,92 \pm 0,25$ – $3,45 \pm 0,10$ МПа. Удлинение при испытании тех же пленок составило 24,4–33,5 %. Результаты оценки биологической активности (регенеративное действие) коллагена позволили определить, что наблюдается усиление пролиферации клеток кератиноцитов в сравнении с опытом без добавления коллагена (в среднем на 20 %). При этом в течение всего эксперимента гибель клеток не наблюдалась, что косвенно свидетельствует об отсутствии токсических свойств коллагена, выделенного из медуз *A. aurita* и *R. hispidum*. На основании проведенных исследований были сделаны выводы, что полученные растворы коллагена без модификации не могут быть использованы для создания биочернил или каркасов для тканевой инженерии, что связано с неудовлетворительными механическими свойствами, которые существенно ухудшаются при использовании мембран во влажных условиях. Указанная задача будет решаться на следующем этапе зачет применения химических сшивающих реагентов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, договор № 075-15-2023-601 (вн. № 13.2251.21.0219).

ВЛИЯНИЕ КОМБИНАЦИЙ АРМИРОВАНИЯ И МАТРИЦЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИДНЫХ 3D-ПЕЧАТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Евгений Лобов*, Артем Пепеляев, Михаил Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: eslobov@pstu.ru

Целью работы является изучение и сравнение эффективности гибридного подхода к армированию для улучшения механических свойств полимерных композитов, полученных с помощью технологии послойного наплавления филамента, с различными комбинациями матриц и наполнителей. Материалы для исследования включали три наиболее распространенных термопластичных полимера: ABS, PA12 и PET-G. Армирование осуществлялось следующими материалами: короткими углеродными волокнами, стеклянными волокнами и коэкструдированными непрерывными углеродными волокнами.

В рамках экспериментальной работы по оценке эффективности гибридного подхода к армированию были подготовлены образцы для испытаний на растяжение в соответствии со стандартом ISO 527-2: 2012. Испытания для определения модуля Юнга и предела прочности выполнялись на универсальной испытательной машине Instron 68SC-5 с постоянной скоростью перемещения 0,5 мм/мин. После механического разрушения образцы подверглись исследованию с помощью сканирующей электронной микроскопии. Данный метод позволил выявить микромасштабные дефекты, изучить механизмы разрушения материала и проанализировать структуру композита на микроуровне. В ходе исследования было проведено комплексное изучение влияния следующих параметров 3D-печати: диаметр сопла, угол заполнения, объемная доля коэкструдированных непрерывных углеродных волокон. Полученные экспериментальные данные для чистых полимеров, материалов, армированных короткими волокнами и гибридных композитов были систематизированы и сопоставлены между собой. Такой комплексный подход позволил получить полную картину механических свойств исследуемых материалов и их зависимостей от различных технологических параметров.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2024-0013).

ГИДРОКСИАПАТИТОВЫЙ ЦЕМЕНТ: ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА РАСТВОРИМОСТЬ *IN VITRO* И РЕЗОРБЦИЮ *IN VIVO*

Юлия Лукина

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии
имени Н.Н. Приорова, ул. Приорова, 10, г. Москва, 127299, Россия

* e-mail: lukina_rctu@mail.ru

Регенераторный потенциал организма способен восстанавливать костную ткань, но ограничен критическим размером дефекта. Для решения проблемы восстановления используются остеопластические, в частности, кальцийфосфатные материалы, состав которых близок к составу неорганической составляющей костной ткани. Гидроксиапатитные кальцийфосфатные цементы относительно нерастворимы при нейтральном pH, но их растворимость увеличивается при более кислом pH. Поэтому они могут резорбироваться остеокластами во время ремоделирования кости. Цементы на основе дигидрата дикальцийфосфата метастабильны при физиологических значениях pH, в связи с чем к механизму активной клеточной резорбции подключается механизм пассивной резорбции при имплантации.

Целью работы является регулирование скорости резорбции гидроксиапатитового цемента за счет применения двух стратегий: ионного замещения и получения метастабильных фаз в конечном продукте, для чего была использована система $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 - \text{CaCO}_3 - \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$.

Определены составы цементного камня в выбранных фигуративных точках диаграммы состава, представляющие собой серию твердых растворов и состоящие из карбонатного гидроксиапатита, преимущественно Б-типа, кальцийдефицитного гидроксиапатита, дикальцийфосфат дигидрата и β -трикальцийфосфата. Выявлена зависимость растворимости цементного камня от исходного состава, коррелирующая со скоростью резорбции и формирования новообразованной костной ткани, определенных по результатам морфометрического анализа при исследовании *in vivo* на мелких лабораторных животных, что позволяет прогнозировать скорость резорбции материала по составу исходной смеси¹. Основные характеристики цементного камня (прочность, пористость, сроки схватывания, pH) указывают на возможность использования цемента в не нагружаемых костных дефектах.

¹ Carbonate-Hydroxyapatite Cement: The Effect of Composition on Solubility In Vitro and Resorption In Vivo / Y. Lukina, L. Bionyshev-Abramov, S. Kotov, N. Serejnikova, D. Smolentsev, S. Sivkov // *Ceramics*. – 2023. – № 6 (3). – P. 1397–1414.

МЕЖТЕЛОВЫЕ КЕЙДЖИ НА ОСНОВЕ АУКСЕТИЧЕСКОГО МЕТАМАТЕРИАЛА: КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В САПР, 3D-ПЕЧАТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Владислав Львов*, Фёдор Сенатов

Университет науки и технологий «МИССИС»,
Ленинский пр-т., 4, г. Москва, 119049, Россия

* e-mail: lvov.va@misis.ru

Ауксетические метаматериалы обладают отрицательным коэффициентом Пуассона, что позволяет им расширяться при растягивающих нагрузках и уменьшать свой объем при сжатии. Такие свойства достигаются за счет создания специальных геометрических структур. Поскольку свойства метаматериалов в большей степени определяются геометрией, чем материалами и методами изготовления, это позволяет оптимизировать биомеханические характеристики медицинских изделий для хирургии позвоночника.

Основная цель исследования – оптимизация межтелового кейджа путем интеграции ауксетических и сотовых структур в объем изделия и проведение анализа механических свойств экспериментальных кейджей, полученных методом 3D-печати на основе сплава Ti-6Al-4V, путем статического сжатия и сравнения с характеристиками костной ткани для изучения потенциального снижения эффекта экранирования напряжения.

Результаты статических испытаний на сжатие (до 15 кН, что в 2,5 раза превышает максимальную нагрузку на позвоночник) показали, что сотовая структура обладает самыми низкими механическими характеристиками. Ускоренное накопление продольной деформации в кейджах на основе сотовых структур приводит к самому низкому значению модуля Юнга по сравнению с другими типами образцов. Тем не менее механические характеристики сотовой структуры были близки к механическим характеристикам трабекулярной кости ($E = 0,043\text{--}0,165$ ГПа) и позвонка ($E = 0,374$ ГПа). Ауксетический кейдж продемонстрировал улучшенные механические характеристики по сравнению с сотовой структурой. При сжимающей нагрузке кейдж с ауксетической структурой показал замедленное накопление продольных деформаций, а также повышенную жесткость, которая увеличилась примерно в 6 раз по сравнению с сотовой структурой ($E = 6,68 \pm 0,28$ ГПа). В результате был получен ауксетический кейдж, механические свойства которого близки к свойствам кортикальной кости

($E = 7\text{--}30$ ГПа), при этом не было выявлено видимых нарушений структуры метаматериала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Стратегического проекта «Биомедицинские материалы и биоинженерия» (Приоритет 2030).

ВЛИЯНИЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ И БИОСОВМЕСТИМОСТЬ СПЛАВА MG-ZN-CA

**Наталья Мартыненко*, Диана Темралиева,
Елена Лукьянова, Ольга Рыбальченко**

Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН,
Ленинский проспект, 49, г. Москва, 119334, Россия

* e-mail: nataliasmartynenko@gmail.com

Магниевые сплавы являются перспективными медицинскими материалами для создания скаффолдов для иммобилизации костей благодаря хорошей биосовместимости и низкому модулю упругости. Однако важной задачей является повышение их механических характеристик для расширения возможностей применения. Для этой задачи целесообразно использовать деформационную обработку, применение которой повышает прочность металлов и сплавов за счет измельчения микроструктуры. Поэтому целью данного исследования было изучение влияния ротационнойковки (РК) на механические свойства, коррозионную стойкость и биосовместимость магниевого сплава Mg-1 % Zn-0,6 % Ca, перспективного для использования в ортопедии. В исходном состоянии сплав отжигали при 450 °С в течение 5 ч с последующей закалкой в воде. РК проводили при 350 °С до достижения логарифмической степени деформации, равной 2,77.

Проведенное исследование показало, что формирование после РК рекристаллизованной микроструктуры с размером зерна $3,2 \pm 0,2$ мкм приводит к повышению прочности сплава без снижения уровня пластичности и коррозионной стойкости. Исследование процесса деградации сплава в закаленном состоянии и после РК как в условиях *in vitro*, так и *in vivo* не выявило существенной разницы между этими двумя микроструктурными со-

стояниями. Однако увеличение продолжительности инкубации сплава в среде на основе DMEM с 4 ч до 24 суток приводит к снижению скорости деградации в 4 раза (с ~ 2 до $\sim 0,5$ мм/год) за счет образования плотного слоя продуктов деградации. Исследование биосовместимости *in vitro* не выявило существенного влияния РК на гемолитическую и цитотоксическую активность сплава. При подкожной имплантации мышам образцов сплава до и после РК признаков системной токсичности не наблюдалось. Однако установлено, что РК способствует равномерной деградации сплава по всей поверхности контакта.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИМЕТ РАН № 075-00319-25-00.

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ВОПРОСЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БИОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РЕГЕНЕРАЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ

Леонид Маслов*, Евгения Ильина, Павел Королёв

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
ул. Рабфаковская, 34, г. Иваново, 153003, Россия

* e-mail: leonid-maslov@mail.ru

Сращение кости после перелома представляет собой сложный биологический процесс, в результате которого поврежденная кость должна полностью восстановить свою целостность и структуру. С развитием способов нежесткой фиксации и частичной поддержки веса большинство переломов заживают непрямым или вторичным сращиванием. Непрямое сращивание начинается с образования гематомы, после чего один фенотип соединительной ткани сменяет другой. Известно, что данная последовательность дифференциации клеток чувствительна к локальному механическому полю внутри ткани.

В работе представлена феноменологическая модель структурной перестройки костной ткани, основанная на критерии дифференциации клеток под управлением внешнего механического стимула периодического характера. Математический алгоритм построен на численном решении уравнений колебаний сплошной среды, описываемой моделью пористого материала, насыщенного жидкостью. Процесс образования клеток и их

миграция в процессе сращения перелома принимается случайным и ненаправленным, что описывается уравнением диффузии. Поскольку основная масса специфических костных клеток располагается на стенках канальцев и поверхностях лагун, входящих в систему микропор, то предполагается, что возмущения, вносимые внешней механической нагрузкой в установившееся движение жидкости в транспортной системе кости, могут обеспечивать передачу управляющих сигналов между клетками ткани в процессе ее регенерации.

Математическая модель дает возможность исследовать механизм восстановления поврежденных костных элементов опорно-двигательного аппарата человека при наличии динамической нагрузки. В частности, имитационное моделирование позволило проанализировать влияние частоты и амплитуды стимулирующей нагрузки на процесс перестройки ткани, что отсутствует в известных источниках, а также влияние характера нагружения на восстановление упругих свойств костной мозоли. Полученные численные результаты представляются достаточно реалистичными и соответствующими известным медицинским исследованиям процессов регенерации костной ткани в зоне перелома.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20118, <https://rscf.ru/project/25-21-20118/>

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УГЛА ПОВОРОТА ПОЗВОНОЧНОЙ АРТЕРИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ГЕМОДИНАМИКИ

Мария Матросова*, Марина Шмурак

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: marymatry@yandex.ru

Нарушение кровотока в позвоночной артерии является одной из важных задач в биомеханике и гемодинамике, так как приводит к ишемии задних отделов мозга и требует точного моделирования для оценки рисков. Актуальность исследования связана с необходимостью разработки расчетных моделей, учитывающих анатомические изгибы позвоночной артерии, вязкоупругие свойства стенок и турбулентные эффекты течения крови. Решение этой задачи позволит оптимизировать диагностику и лечение пациентов с вертебробазилярной недостаточностью.

Исследование численного анализа влияния угла наклона артерии на гемодинамические характеристики кровотока в позвоночной артерии было проведено с использованием программного обеспечения ANSYS, которое позволило моделировать как стационарный, так и нестационарный кровоток при различных значениях угла поворота. Кровь моделировалась как ньютоновская жидкость и как жидкость Каро. Полученные результаты демонстрируют колебания средней скорости кровотока порядка десяти процентов и возникновение вихревых структур в области угла наклона, что может оказывать отрицательное воздействие на состояние сосудистых стенок. Также было зафиксировано динамическое перераспределение давления и снижение объемного расхода крови.

Кроме того, результаты для ньютоновской и неньютоновской жидкости также имели отличия в градиенте распределения давлений и WSS. Также изолинии скорости позволили заметить наглядное различие в кровотоке. Области максимальных значений всех параметров изменились в моделях: в ньютоновской модели в конце дуги поворота максимальные значения на внешней и внутренней стенке, в то время как в модели Каро такие области имеются только на внешней стенке.

Данные исследования подтверждают, что угол поворота артерии является важным фактором в гемодинамических процессах, и его отклонения могут приводить к нарушению кровоснабжения головного мозга.

БИОРЕЗОРБИРУЕМЫЕ ИМПЛАНТАТЫ НА ОСНОВЕ СПЛАВА ZX10: СВЯЗЬ МЕХАНИЧЕСКИХ И КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ С ТЕХНОЛОГИЕЙ ТМО

**Дмитрий Мерсон*, Алексей Данюк, Евгений Мерсон,
Александр Брилевский**

Научно-исследовательский институт прогрессивных технологий Тольяттинского государственного университета, ул. Белорусская, 14, г. Тольятти, 445020, Россия

* e-mail: d.merson@tlttsu.ru

В Тольяттинском государственном университете начат коммерческий выпуск биорезорбируемых имплантатов на основе магниевых сплавов ZX10 (Mg-1Zn-0.12Ca), свойства которого существенно зависят от технологии производства. Целью работы являлось установить зависимости ме-

ханических свойств и скорости резорбции сплава ZX10 от технологии термомеханической обработки (ТМО) и кристаллографической ориентации.

Всего исследованы образцы металла в 5 различных состояниях: литое, экструдированное, волочение, всесторонняя изотермическая ковка (ВИК) и прокатка. Для каждого из состояний исследованы свойства в двух направлениях: ED и TD, а после прокатки в трех: RD, ND и TD.

Основные результаты сводятся к следующему:

1. С позиции соотношения предела текучести и относительного удлинения наилучшие свойства демонстрирует состояние ВИК+горячая прокатка.

2. Наименьшей коррозионной стойкостью обладают те сечения текстурированных полуфабрикатов магниевого сплава ZX10, в которых преобладают зерна с призматической и пирамидальной ориентациями, а зерна с базисной ориентацией отсутствуют. Даже небольшое количество зерен с базисной ориентацией резко повышает коррозионную стойкость поверхности полуфабриката, при этом дальнейшее увеличение количества таких зерен может оказывать незначительный эффект на скорость коррозии.

3. Наибольшей коррозионной стойкостью среди исследованных полуфабрикатов сплава ZX10 обладают прутки, экструдированные как из литого состояния, так и из поковки после ВИК с последующим волочением. Поковка, полученная путем ВИК, имеет среднюю коррозионную стойкость, которая, вероятно, может быть повышена путем подбора режимов ВИК, исключающих образование в микроструктуре частиц тройной фазы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 23-19-00636.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТОЙКОСТЬ К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА ZX10

**Евгений Мерсон*, Виталий Полуянов,
Павел Мягих, Дмитрий Мерсон**

Научно-исследовательский институт прогрессивных технологий Тольяттинского государственного университета, Белорусская, 14, г. Тольятти, 445020, Россия

* e-mail: Mersoned@gmail.com

Металлические биорезорбируемые имплантаты для остеосинтеза в процессе эксплуатации испытывают высокие механические нагрузки

при одновременном воздействии на них агрессивной среды человеческого тела. Такие условия являются благоприятными для развития коррозионного растрескивания под напряжением (КРН). Это опасное явление заключается в том, что при достижении определенного порогового уровня напряжений (обычно ниже предела текучести) в металле начинается процесс образования и распространения макрохрупких трещин, что в конечном счете приводит к преждевременному разрушению изделий при нагрузках существенно ниже расчетных. Более того, поскольку сечение биорезорбируемых имплантатов постепенно уменьшается с течением времени, действующие напряжения в них могут вырасти выше пороговых в том случае, если растворение имплантата происходит быстрее восстановления несущей способности костных тканей. Таким образом, стойкость к КРН является одной из важнейших характеристик металлических биорезорбируемых имплантатов, наряду со скоростью их коррозии (растворения). Настоящая работа была посвящена выяснению влияния различных видов термомеханической обработки на стойкость магниевого сплава ZX10 к КРН. Коррозионно-механические испытания в растворе Хэнкса при температуре 37 °С при низкой скорости деформирования показали, что среди исследованных материалов наиболее высокой стойкостью к КРН, выраженной в виде наименьшей потери пластичности и прочности (по отношению к образцам испытанным на воздухе), обладают образцы, вырезанные из поковки, полученной методом всесторонней изотермическойковки (ВИК), в то время как в экструдированном состоянии данный сплав обладает гораздо меньшей стойкостью к КРН, но более высокой стойкостью к коррозии. Образцы, изготовленные из прутка, полученного путем равноканального углового прессования (РКУП), показали промежуточную стойкость к КРН и коррозии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 23-19-00636.

О ВЛИЯНИИ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ТЕЛА НА ВРЕМЯ ПРИХОДА ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ

**Ирина Мизева ^{1*}, Наталья Подолян ², Роман Ромашко ²,
Виктор Кашченко ^{3,4}, Мария Васильева ⁴, Анастасия Саковская ⁵,
Олег Мамонтов ^{6,7}, Алексей Камшилин ²**

¹ Институт механики сплошных сред УрО РАН,

ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614010, Россия

² Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,

ул. Радио, 5, г. Владивосток, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет,

Университетская набережная, 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия

⁴ Северо-Западный окружной научно-клинический центр имени Л.Г. Соколова ФМБА,
пр. Культуры, 4, г. Санкт-Петербург, 194291, Россия

⁵ Тихоокеанский государственный медицинский университет,

пр. Острякова, 2, г. Владивосток, 690002, Россия

⁶ Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова Минздрава
России, ул. Аккуратова, 2, г. Санкт-Петербург, 197341, Россия

⁷ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени
академика И.П. Павлова, ул. Толстого 6/8, г. Санкт-Петербург, 197022, Россия

* e-mail: mizeva@icmm.ru

Время прихода пульсовой волны (ВППВ) на периферию является интегральной характеристикой механических свойств кровеносной системы, используемой как для мониторинга артериального давления в каждом сердечном цикле, так и для диагностики состояния артерий. В данной работе мы изучали изменения ВППВ, вызванные локальным нагревом небольшой области предплечья. Измерения проводились с помощью новой мультимодальной системы визуализирующей фотоплетизмографии (ВФПГ), синхронизированной с электрокардиограммой. Этот бесконтактный оптический метод позволяет оценить динамику изменений амплитудных и временных параметров микроциркуляции с высоким разрешением. В исследовании приняли участие 98 добровольцев, у которых было проведено 136 записей отклика периферийного кровотока в предплечье на нагрев до 40–41 °С, с длительностью каждой записи не менее 40 мин.

Как известно, нагрев тела приводит к значительному увеличению амплитуды пульсовой компоненты сигнала ВФПГ, обусловленному тепловой вазодилатацией. При этом мы впервые обнаружили значительное уменьшение ВППВ в нагретом состоянии по сравнению с начальным значением:

в среднем 261 и 216 мс соответственно. В среднем относительное уменьшение времени было обнаружено у всех испытуемых без исключения и составляло 15 %, превышая 30 % у некоторых испытуемых.

Следует подчеркнуть, что как увеличение индекса перфузии, так и уменьшение ВППВ имело выражено локальный характер: вне области нагревания значимых изменений этих параметров кровотока выявлено не было. Мы предполагаем, что обнаруженное явление обусловлено перераспределением кровотока в пользу поверхностных сосудов кожи при нагреве и может служить количественным маркером эффективности процессов терморегуляции организма.

ВЯЗКОУПРУГОЕ И ВЯЗКОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СМАЗОК

Юрий Носов*, Анна Каменских

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: ura.4132@yandex.ru

Смазочные материалы применяются для снижения фрикционного контакта элементов и формирования стабильной масляной пленки для защиты высоконагруженных элементов протетических систем [1]. Смазки используются в рамках суставных протезов, при этом отмечается большой процент возникновения внештатных операций замены искусственных суставов, связанных с появлением скрипа из-за дефицита смазки или ее неэффективной работы. Рассматривается вариант увеличения объемов смазочного материала за счет структурирования поверхностей контакта. Альтернативой для понимания механизмов контактного взаимодействия биомеханических систем с учетом смазки может стать моделирование нелинейного поведения смазочных материалов. Нелинейные модели поведения смазок могут позволить получить эволюцию напряженно-деформированного состояния биомедицинских конструкций.

В рамках работы предложен подход к моделированию нелинейного поведения смазочных материалов с учетом вязкости и пластичности материалов, а также временных и температурных факторов. Выполнена оценка возможности применения вязкоупругих моделей поведения смазки для прогнозирования работы в сложных условиях [2]. Предложена модифицированная модель вязко-

упругопластического поведения смазки, которая позволяет получить более точные результаты моделирования. Предложенные модели могут быть использованы для прогнозирования работы биомедицинских изделий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00470, <https://rscf.ru/project/25-29-00470/>.

Список литературы

1. Кумар С.Й. Раджесвара Рао К.В.С., Яламалле С.Р. Исследование IN VITRO трибологических характеристик полиэфирэфиркетона с целью его применения в тотальной артропластике коленного сустава // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 47–54.
2. Nosov Y.O., Kamenskikh A.A., Bogdanova A.P. Description of the Lubricant Behavior Based on the Theory of Elasto-Viscoplastic // Materials. – 2025. – Vol.18. – Art. 1360.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДАМИ- ИНСТРУМЕНТАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ АДДИТИВНЫМИ МЕТОДАМИ

**Тимур Абляз*, Евгений Шлыков,
Илья Осинников, Владимир Блохин**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия
* e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru

При изготовлении современных медицинских изделий часто возникает задача обработки сложнопрофильных рабочих поверхностей. Метод копирувально-прошивной электроэрозионной обработки позволяет обрабатывать конструктивные элементы вне зависимости от сложности профиля. Существенным недостатком данного метода являются технологические сложности при изготовлении электродов-инструментов (ЭИ) лезвийным инструментом. Для их изготовления актуально метод селективного лазерного сплавления (SLM). Однако не в полной мере изучены технологические особенности КПЭЭО электродами-инструментами, полученными аддитивными методами.

В рамках исследования изготовлены сложнопрофильные электроды-инструменты четырех конфигураций методом селективного лазерного плавления на установке 3D-LAM Mid из порошкового материала MS1. Показана возможность КПЭЭО с применением ЭИ из материала MS1, полученных методом SLM.

Установлено, что при использовании различных конфигураций ЭИ после наблюдается снижение параметров шероховатости самих ЭИ в процессе обработки с 6 до 3 мкм при обработке на минимальном режиме. Повышение силы тока приводит к общему увеличению параметра шероховатости по Ra с 6 до 6,5 мкм. Среднее значение параметра шероховатости по Ra поверхности детали после обработки на min-режиме составляло $Ra = 3,09$ мкм, а после КПЭЭО на max-режиме составляло $Ra = 2,7$ мкм. Установлено, что при использовании различных конфигураций ЭИ параметры шероховатости находятся в одном классе (5-й класс шероховатости).

Показано, что при КПЭЭО электродами-инструментами наблюдается их значительный износ. Установлено, что при КПЭЭО на минимальном режиме наибольший массовый износ наблюдается у ЭИ сегментного типа и ЭИ с ячеистым заполнением и составляет 0,045 и 0,026 г соответственно. При КПЭЭО на максимальном режиме износ данных ЭИ составляет 1,35 и 1,65 г. Наименьший массовый износ наблюдается у ЭИ типа сфера и ЭИ пирамидального типа. После КПЭЭО на минимальном режиме их износ составляет 0,012 и 0,004 г, на максимальном 0,26 и 0,41 г соответственно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА РЕКОНСТРУИРОВАННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ДЕГРАДАЦИИ ОБРАЗЦОВ СКАФФОЛДОВ

**Денис Павлецов ¹, Наталия Еленская ^{1*}, Евгений Садырин ²,
Илья Виндокуров ¹, Михаил Ташкинов ¹**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

²Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344003, Россия

* e-mail: n.elenskaya@pstu.ru

Замещение костной ткани одна из актуальных проблем в медицине. Для содействия регенерации и заживления дефектов костной ткани изго-

тавливаются имплантаты (скаффолды). Аддитивное производство стало революционной технологией для изготовления объектов со сложными внешними формами и строго контролируемой внутренней пористой структурой, что является критически важным для производства скаффолдов. Материалы, из которых производят скаффолды, обязательно должны быть биосовместимыми, а в ряде случаев могут быть также биорезорбируемыми (обладать способностью деградировать под воздействием биологической среды). Для таких материалов остро встает вопрос прогнозирования изменения механических и структурных свойств скаффолда в процессе деградации.

Целью данной работы было численное исследование механического отклика образцов функционально-градиентных скаффолдов на основе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП), подвергнутых эрозионному воздействию жидкой среды и реконструированных по данным компьютерной микротомографии. Реконструкция была проведена для образцов без воздействия и образцов, которые были предварительно выдержаны в физиологическом растворе на протяжении 7 и 14 дней при температуре 37 °С. Для полученных численных моделей был проведен анализ геометрических особенностей структур и исследование изменения механического отклика при различных условиях нагружения. Сопоставление результатов проводилось с эталонной численной моделью-прототипом, на основе которой изначально были изготовлены образцы скаффолдов.

Продемонстрированы отличия между архитектурой численной модели и прототипами скаффолдов, изготовленных по технологии FDM. Выявлено незначительное изменение морфометрических параметров структур под воздействием жидкой среды. Показано хорошее качественное и количественное сходство в механическом отклике между прототипом и изготовленным образцом без воздействия, в также изменения в механическом отклике, связанные с деградацией свойств материала.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2025-0001).

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ГУБЧАТОЙ КОСТИ ГОЛОВОК БЕДРА ЧЕЛОВЕКА

**Ирина Паршина^{1*}, Илья Виндокуров², Михаил Ташкинов²,
Евгений Садырин³, Александр Доль¹, Дмитрий Иванов¹**

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

³ Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

* e-mail: abitovaif@rambler.ru

Цель данной работы состояла в комплексном исследовании механических свойств губчатой кости головок бедра в зависимости от направления нагружения, объемной минеральной плотности кости (МПК) и пористости. Задачами исследования являлись:

- проведение механических одноосных экспериментов на сжатие образцов костей в трех направлениях;
- измерение объемной МПК и пористости образцов;
- построение регрессионных зависимостей, связывающих механические свойства и объемную МПК губчатой кости;
- построение регрессионных зависимостей, связывающих механические свойства и пористость губчатой кости.

Образцы губчатой кости изготавливались из головок бедренных костей человека, они выпиливались в трех направлениях: вдоль (ось Z) и поперек (оси X и Y). Высота образцов варьировалась от 20 до 37 мм, ширина (длина) – от 3,5 до 7,7 мм.

Было показано, что объемная МПК с высоким коэффициентом детерминации (более 0,66) определяет модуль упругости по трем направлениям. Пористость губчатой кости, измеренная по авторской методике, варьировалась от 0,59 до 0,95. Получены зависимости эффективного модуля упругости и предела прочности от пористости. Также получены коэффициенты Пуассона по трем направлениям тех же образцов.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания, проект FSRR-2023-0009.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АДДИТИВНО ИЗГОТОВЛЕННЫХ БИОСОВМЕСТИМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ирина Пашченко*, Михаил Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: pashchencoia@pstu.ru

Трибологические процессы в биосистемах играют решающую роль в обеспечении долговечности и функциональности биоустройств. Трибологические характеристики 3D-биоматериалов связаны не только с условиями эксплуатации, типом трения, биodeградацией, но и с микроструктурой, шероховатостью и пористостью поверхности, которые зависят от настройки параметров печати, выбора материала и метода постобработки. Для прогнозирования и контроля процессов трения и износа биоматериалов в живой среде необходима систематизация имеющихся данных о взаимодействии биоустройств с живой тканью, связи трибосвойств с параметрами печати, а также способов улучшения и методов исследования трибологических свойств аддитивно изготовленных биоматериалов.

Для оценки современного состояния биотрибологии 3D-печатных материалов был проведен комплексный обзор исследований и разработок в данной области. Было выявлено, что улучшение трибологических свойств аддитивно изготовленных биоматериалов сосредоточено на создании композиционных материалов на основе полимеров и керамики, использовании «умных материалов» и 4D-печати для адаптации свойств под действием биожидкостей, разработке методов модификации поверхности для снижения шероховатости поверхности, оптимизации параметров печати для достижения наилучшего качества поверхности и создания сложных структур для быстрой интеграции, в том числе биомиметических структур.

В качестве основных проблем в области разработки 3D-биоматериалов можно выделить ограниченность выбора материалов с оптимальным сочетанием параметров и сложность контроля микроструктуры поверхности. Основные сложности в изучении трибологии биоматериалов заключаются в изменении свойств в среде организма из-за биodeградации, в отсутствии стандартных методов исследования трибологических свойств биосовместимых материалов, а также низкой точности существующих моделей прогнозирования изнашивания в сложных биомеханических системах.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2024-0013).

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ЗАГОТОВОК ПРОТЕЗОВ СТОП ЧЕЛОВЕКА

**Кирилл Первухин ^{1*}, Артем Филиппов ^{1,2}, Юрий Карнаухов ²,
Евгений Лутошкин ², Виталий Посев ²**

¹ Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

² ООО «Техноресурс», ул. Инженерная, 16, г. Новосибирск, 630090, Россия

* e-mail: kirillpervukhin@mail.ru

Углепластиковые композиционные материалы (композиты) имеют ряд преимуществ, которые делают их привлекательными для использования в авиационной, автомобильной, строительной, спортивной и других отраслях промышленности. В частности, они обладают высокой прочностью и жесткостью при небольшом весе, обеспечивая широкие возможности проектирования легких, но прочных конструкций. Одним из развивающихся направлений применения углепластиковых материалов является разработка и создание различных биомедицинских устройств: протезов и ортезов конечностей, элементов экзоскелетов и др. Целью настоящей работы является сравнение показателей удельной жесткости для углепластиковых заготовок протезов стоп человека при различных схемах нагружения. Механические испытания проводились на электромеханической испытательной машине Test Systems УТС-111.2-100-52. Образцы испытывались на изгиб по трем схемам: 1) консольный изгиб, 2) трехточечный изгиб, 3) изгиб в оснастке. Предварительная нагрузка и скорость испытания была установлена на уровне 50 Н и 1 мм/мин. Радиус закругления всех опор равнялся 10 мм. Нагрузка образцов во избежание деформации осуществлялась до 500 Н или прогиба 20 мм. В процессе испытания фиксировались нагрузка F и величина прогиба h . Образцы для проведения механических испытаний отличались по длине заготовки. В результате проведенных работ показано, что зависимости удельной жесткости от типа полученных заготовок качественно совпадают при различных схемах испытаний.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме № 124070500003-6. При проведении исследований использовано оборудование ЦКП «Пластометрия».

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ АРХИТЕКТУРЫ СКАФФОЛДОВ НА ВОЗМОЖНОСТИ РЕПЛИКАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТИ

Юлия Пирогова*, Михаил Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: yu.pirogova@pstu.ru

Дефекты костной ткани и остеоартрит являются основными причинами необходимости клинического восстановления и трансплантации костной ткани. В качестве альтернативы традиционной трансплантации всё чаще применяют искусственные пористые скаффолды. Большинство исследований было сосредоточено на структурах в рамках одного типа элементарных ячеек, в то время как сравнению между структурами разных типов уделяется меньше внимания. Поскольку свойства скаффолдов напрямую зависят от их внутренней архитектуры, необходима комплексная оценка их эффективности для замещения дефектов костной ткани.

Цель данного исследования – оценить влияние различных конструкций скаффолдов на имитацию свойств замещаемого фрагмента трабекулярной кости с учетом особенностей механических и морфометрических параметров. Анализ основан на взаимосвязи внутренней архитектуры скаффолда и его механических характеристик. Проведено сравнение нескольких типов как периодических, так и случайных 3D-структур, спроектированных на основе различных подходов. Деформационное поведение скаффолдов, накопление повреждений и упругие свойства оценивались численно и были сопоставлены с экспериментальными результатами испытаний на сжатие с использованием метода цифровой корреляции изображений. Также было рассмотрено изменение механического отклика исследуемых прототипов структур при добавлении гидрогеля, имитирующего костный внеклеточный матрикс. Были представлены рекомендации по оптимальному дизайну скаффолдов для регенерации трабекулярной структуры с учетом проведенного исследования. Такой подход позволил оценить степень соответствия искусственных скаффолдов природным структурам и их потенциал для успешной интеграции и восстановления кости.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2025-0001).

3D-ПЕЧАТЬ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ: МЕДИЦИНСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

**Всеволод Побежимов ^{1*}, Артур Крупнин ^{1,2},
Денис Брешенков ³, Эдуард Чарчян ³**

¹ НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, 123098, г. Москва, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, г. Москва, 105005, Россия

³ Российский научный центр хирургии имени академика Б. В. Петровского,
Абрикосовский пер., 2, 119435, г. Москва Россия

* e-mail: vsemyvladeyu@mail.ru

На сегодняшний день, технология экструзионной 3D-печати методом послойного наплавления прутка выделяется своей распространенностью и доступностью для широкого круга потребителей. Тем не менее прогресс в этой области обусловлен не только коммерческими инициативами, но и усилиями независимых разработчиков, реализующих проекты с открытым исходным кодом.

Устройства, предназначенные для 3D-печати на цилиндрических поверхностях, представляют собой уникальные, дорогостоящие и технически сложные решения. Необходимость в разработке альтернативы возникает при создании лабораторных и других прототипов медицинских изделий, обладающих осевой симметрией, в частности, изделий для сердечно-сосудистой хирургии.

В рамках данной работы создание устройства осуществлялось с использованием стандартного 3D-принтера Creality Ender 3V2 в качестве основы. Для оптимизации рабочих характеристик и расширения функциональных возможностей принтер был подвергнут модернизации, включающей конструкцию экструдера, а также замену стандартной прошивки для обеспечения более точной настройки параметров печати.

Разработанная система позволяет осуществлять печать на цилиндрических поверхностях без внесения существенных изменений в прошивку принтера. Ключевым аспектом при работе с устройством является корректная подготовка 3D-моделей, закладываемая еще на этапах моделирования и нарезки. В работе продемонстрированы макеты изделий и результаты лабораторных испытаний.

Работа проведена частично в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (модификация 3D-принтера, изготовление образцов). Работа проведена частично в рамках соглашения от 08.04.2025 г. № 350-ЭА-25-ХТ между НИЦ «Курчатовский институт» и ФГБНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского» (характеризация изделий).

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДВИЖЕНИЙ ПРИ КОРРЕКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТОЙКИ ЧЕЛОВЕКА ПОСЛЕ ТОЛЧКА В ГРУДЬ

Максим Подоприхин ^{1*}, Владимир Китов ², Павел Кручинин ¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1,
г. Москва, 119991, Россия

² Институт медико-биологических проблем РАН,
Хорошевское шоссе, 76 а, г. Москва, 123007, Россия

* e-mail: podoprikhin.maxim@gmail.com

Рассматривается метод исследования вертикальной стойки человека посредством регистрации коррекционных ответов на возмущения, наносимые толчком в грудь. Такое обследование известно в биомеханике [1; 2] и проводится на стабилометрической платформе. В ряде случаев человека толкают при помощи силомера, расположенного в руке, вследствие чего сила толчка отличается не только от испытуемого к испытуемому, но и в различных пробах. Это затрудняет проведение сравнений.

Для выявления различий между испытуемыми предлагается использовать параметры, полученные при сравнении движения с соответствующими траекториями для решения задач управления: задачи быстрогодействия и PD-регулятора.

Предполагается, что после полетов в системе управления движением человека возникают существенные изменения, которые отразятся на движении человека [2]. Это предположение использовано для предварительной проверки подхода на примере данных обследований, полученных до и после космических полетов.

Исследование осуществлено в рамках программы фундаментальных исследований ГНЦ РФ – ИМБП РАН (№ FMFR-2024-0033).

Список литературы

1. Effects of localized muscle fatigue on recovery from a postural perturbation without stepping / B.S. Davidson, M.L. Madigan, M.A. Nussbaum, L.A. Wojcik // *Gait & Posture*. – 2009. – Vol. 29, № 4. – P. 552–557.
2. Саенко Д.Г., Артамонов А.А., Козловская И.Б. Характеристики позных коррекционных ответов до и после длительных космических полетов // *Физиология человека*. – 2011. – Т. 37, № 5. – С. 91–99.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В РАМКАХ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА

Татьяна Полякова*, Сергей Гаврюшин

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет),
2-я Бауманская ул., 5, стр. 4, г. Москва, 105005, Россия
* e-mail: tpolyakova@bmstu.ru

Современная стоматологическая система в рамках концепции Индустрии 4.0 представляет собой сложный набор множества технологических инструментов, приложений и целых научных областей. Цель научного исследования – разработка математических моделей, алгоритмов и методов поведения биомеханической конструкции при временной имплантации. Был предложен вариант оптимизации расчетов положения временных dentальных имплантатов в челюсти в рамках мультиагентного подхода¹. Основной критерий оптимизации: все имплантаты должны равномерно распределять напряжения в кости. Был написан прототип программы на языке Python, позволяющий позиционировать имплантаты в челюсти и оценивать НДС конструкции, а также модуль для визуализации данных расчетов с применением Blender Python API. Программа проходит этап тестирования на виртуальной модели, полученной по томограмме нативной модели нижней челюсти. Концептуальная схема программы представляет собой традиционное для ИИ разделение на данные и логику (систему управления). Систему управления можно представить в виде дерева поведения, листьями которого являются расчетные случаи базовых шаблонов положений имплантатов; если положение оптимально, оно уточняется в окрестности положения имплантата (по триангуляции Делоне). В рамках концепции цифровой стоматологии результаты работы будут внедрены в учебный процесс в стоматологических университетах, а также могут быть полезны практикующим стоматологам.

¹ Poliakova T., Gavriushin S., Arutyunov S. Virtual Simulation of the Surgery of Installing Transitional Implant Dentures for the Two-Stage Dental Implant Osteointegration Period // In: Hu, Z., Wang, B., Petoukhov, S., He, M. (eds) Advances in Artificial Systems for Power Engineering II. AIPE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. – 2022. – Vol. 119. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-97064-2_18.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КАК ФАКТОРЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ БЕДРЕННОГО КОМПОНЕНТА ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА ИЗ УУКМ С ПОВРЕЖДЕННОЙ ПИРОУГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЕЙ

Егор Разумовский *

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: erazumovskij@yandex.ru

Углеродные композиционные материалы (далее – УУКМ) существенным образом отличаются от большинства конструкционных материалов разбросом физико-механических характеристик. В первую очередь это обусловлено сложной иерархией технологии производства УУКМ. Основным элементом неоднородности УУКМ является пироуглеродная матрица, которая имеет стохастическую структуру. Случайность структуры поликристаллической пироуглеродной матрицы приводит к реализации предельных значений напряжений в зернах пироуглерода при невысоких макроскопических нагрузках, вследствие чего матрица повреждается и в определенных областях конструкции может представлять собой гранулированную среду.

В бедренном компоненте эндопротеза тазобедренного сустава (далее – эндопротез ТБС) из УУКМ при нагрузке были идентифицированы аналогичные области. В областях эндопротеза, где пироуглеродная матрица повреждена, очевидно, повреждена и костная ткань, которая на этапе остеоинтеграции образовала костно-углеродный каркас. Влияние биологических процессов – костного ремоделирования и остеоинтеграции, на эндопротез ТБС приведет к изменению механического состояния конструкции.

Целью исследования является оценка изменения упругих свойств УУКМ в поврежденных областях эндопротеза ТБС и оценка изменения несущей способности эндопротеза.

Полученные в работе математические модели представляют собой комбинации уравнений теории перколяции, теории вероятности и механики композиционных материалов.

Разработанная в исследовании теоретико-вероятностная модель позволила наиболее точно предсказать изменение несущей способности эндопротеза ТБС.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2023-0006).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИАКРИЛАМИДА: МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

**Полина Колоколова ¹, Тимофей Роденков ², Артур Крупнин ^{2,3},
Кристина Антипова ³, Алина Истомина ³**

¹ Российский технологический университет МИРЭА,
проспект Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, г. Москва, 105005, Россия

³ НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, г. Москва, 123182, Россия
* e-mail: temkrepa@yandex.ru

Гидрогели – это полимерные материалы с трехмерной структурой, способные удерживать воду и регулировать высвобождение веществ, что делает их незаменимыми в медицине и сельском хозяйстве. Механические характеристики, схожие с биологическими тканями, а также биосовместимость позволяют использовать гидрогели для доставки лекарств и создания медицинских фантомов. Несмотря на то что данный класс полимерных материалов, а также композиционных материалов на их основе широко используется в различных отраслях, изучение и корректное описание механического поведения таких систем является все еще не решенной научной проблемой.

В работе синтезированы композиционные гидрогели на основе полиакриламида с разной степенью наполнения наночастицами α -хитина, полученными методами кислотного гидролиза и ТЕМПО-окисления в щелочной среде, с применением двух вариантов систем инициаторов полимеризации. Исследованы различные подходы к определению механических характеристик мягких материалов, способных имитировать биологические ткани. Проведена серия циклических испытаний на индентирование, оценены значения модулей упругости первого рода с использованием различных моделей контактной механики. Полученные результаты верифицированы при помощи обратного конечно-элементного моделирования с применением гиперупругих моделей. Для каждого из материалов смоделированы представительные элементарные объемы и определены приведенные упругие характеристики.

Работа проведена в рамках выполнения Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДДИТИВНО ПОЛУЧАЕМОГО ПОРИСТОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ДЛЯ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Александр Рыжкин*, Нариман Еникеев, Денис Мельников

Уфимский университет науки и технологий,
ул. Заки Валиди, 32, г. Уфа, 450076, Россия

* e-mail: alex.sandr00@bk.ru

Актуальность разработки и использования пористых структур обусловлена их потенциалом эффективного применения в биомедицине. Биосовместимые пористые материалы можно использовать в качестве костных имплантатов и скаффолдов, в том числе в качестве платформы для локализованной доставки лекарственных препаратов к пораженным тканям. 3D-печать обеспечивает создание индивидуальных конструкций со сложной внутренней геометрией, что позволяет контролировать механические свойства напечатанных структур в широком диапазоне, а также улучшать их биосовместимость.

В рамках представленного исследования были спроектированы различные геометрии пористых структур, предназначенные для 3D-печати, с использованием моделей трижды периодичных минимальных поверхностей. Получены модели структур, обладающие разнообразными параметрами пространственных конфигураций и внутренней топологии, в соответствии с которыми методом селективного лазерного сплавления были напечатаны образцы из титанового сплава Ti-6Al-4V. В ходе работы изучали соответствие спроектированных и напечатанных структур, а также их механические характеристики в состоянии как после печати, так и термообработки. Рассматриваются проблемы, связанные с аддитивным производством этих структур для соответствия медицинским требованиям.

На основе результатов, полученных в ходе проведенных испытаний, можно улучшить комбинации механических характеристик пористых имплантатов. Полученные результаты сопоставлены с литературными данными по эффективности и перспективности применения пористых медицинских имплантатов, полученных методом 3D-печати.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-69-10003.

ВОПРОСЫ ХРАНЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ НИТИНОЛА

**Андрей Савченко ^{1*}, Александр Уласевич ², Александр Аншиц ²,
Денис Бодяк ², Владимир Минченя ²**

¹ Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск, 220013, Республика Беларусь

² Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,
ул. Я. Коласа, 24, к. 34/1, г. Минск, 220013, Республика Беларусь

* e-mail: alsavchenko@bntu.by

Объектом исследования являются эндопротезы сосудов для кардиохирургии, в частности, стентграфты. Отличительной особенностью многих эндопротезов является материал металлических элементов – нитинол, обладающий эффектом памяти формы, то есть ранее зафиксированная при термической обработке форма изделия может быть восстановлена нагревом до температуры фазового перехода.

В ходе исследований было отмечено, что у некоторых стентграфтов, извлеченных из системы доставки после нескольких месяцев хранения, уменьшается размер в раскрытом состоянии, снижается радиальная жесткость. Для исследования этого эффекта были взяты образцы одинаковых стент-элементов для системы аортального стентграфта, изготовленные с различными режимами термической обработки. Все заготовки были помещены в металлические трубки диаметром 8 мм, имитирующие чехол системы доставки. В течение 6 месяцев образцы выдерживались в кримпированном состоянии с ежемесячным контролем. Хранение осуществлялось при комнатной температуре и при сниженной за границу фазовых переходов.

В ходе исследований установлено следующее. Первые изменения в диаметре и радиальной жесткости стали появляться через два месяца хранения, до этого заметных изменений не происходило. За 6 месяцев хранения максимальное уменьшение диаметра составило около 5 % и наблюдалось через 4 месяца. В последние 2 месяца изменения диаметра не наблюдались. Снижение радиальной жесткости проявилось через 2 месяца и продолжалось в течение всего периода исследования. Максимальное снижение составило около 15 %. У образцов, хранившихся при сниженной температуре, деградация выражена в меньшей степени.

Можно сделать вывод, что для сохранения механических характеристик медицинских изделий на основе нитинола при их длительном хранении необходимы условия, обеспечивающие температуру ниже температуры фазовых переходов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ

Екатерина Садовченко ¹, Михаил Жмайло ¹, Елизавета Черновол ²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия

² Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова,
Писаревский проспект, 47, г. Санкт-Петербург, 191015, Россия

* e-mail: sadovchenko.e@compmechlab.ru

Надежность зубных имплантатов определяется их стабильностью и устойчивостью к жевательным нагрузкам, что обеспечивает длительную функциональность конструкции и снижает риск послеоперационных осложнений. Однако оценка данного параметра представляет собой сложную диагностическую задачу, поскольку требует комплексного подхода и сопряжена с объективными трудностями при клинических измерениях.

Одним из способов контроля устойчивости зубных имплантатов считается методика RFA (resonance frequency analysis) [1; 2]. В основе данного метода лежит принцип измерения колебательной реакции преобразователя, зафиксированного на имплантате. Диагностический процесс осуществляется с помощью специализированного оборудования: электронный прибор генерирует электромагнитные волны заданной частоты, которые вызывают ответные колебания измерительного штифта, установленного на головке имплантата.

Ввиду того что оборудование, подавая импульсное магнитное воздействие на расположенный на конце абатмента магнитный элемент, возбуждает в сборке из имплантата и насадки свободные колебания, кажется вполне обоснованным предположение, что фактически устройство производит измерение первой собственной частоты. В условиях численных экспериментов проведение оценки первой собственной частоты возможно с помощью модального анализа, который является базовым инструментом различных систем инженерного анализа.

В данной работе основное внимание уделяется сопоставлению данных компьютерного моделирования с клиническими измерениями стабильности ISQ (implant stability quotient), что позволяет улучшить прогнозирование стабильности имплантатов.

Список литературы

1. Остапович А.А. Динамика стабильности дентальных имплантатов в процессе их остеоинтеграции. – Белгород, 2024. – С. 432–436.
2. Atsumi M., Park S.-H., Wang H.-L. Methods used to assess implant stability: current status // International Journal of Oral & Maxillofacial Implants. – 2007. – Vol. 22, № 5. – P. 743–754.

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СВОЙСТВ СОВРЕМЕННЫХ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ И ОКРУЖАЮЩИХ ИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ЗУБА

Евгений Садырин ^{1*}, Павел Антипов ¹, Егор Лактионов ², Майкл Свэйн ³

¹ Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344003, Россия

² Стоматологическая поликлиника в г. Ростове-на-Дону,
ул. Пушкинская, 211/95, г. Ростов-на-Дону, 344022, Россия

³ Сиднейский университет, Кэмпердаун Новый Южный Уэльс 2050,
г. Сидней, 2006, Австралия
* e-mail: esadyrin@donstu.ru

Исследовались механические и трибологические характеристики пломб из композиционного материала и стеклоиономерного цемента, а также здоровой и деминерализованной эмали и дентина человека. Результаты исследования дополнены данными о микроструктуре и адгезионных свойствах биологических тканей зуба, полученными с помощью сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии соответственно в окрестности биосовместимых стоматологических материалов. Дополнительно было проведено исследование плотности минерализации и микроструктуры тканей зуба с использованием рентгеновского компьютерного микромографа. Для исследования использованы моляры человека, удаленные по ортодонтическим показаниям в стоматологическом отделении клиники Ростовского государственного медицинского университета (выписка 14/21 от 23 сентября 2021 г. локального независимого этического комитета Ростовского государственного медицинского университета) и в Стоматологической поликлинике в г. Ростове-на-Дону (выписка 1 от 15 января 2024 г. локального независимого этического комитета ДГТУ), пациенты предоставили информированное согласие.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00829, <https://rscf.ru/project/25-29-00829/>»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА: ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В ВОЗДУХОНОСНЫХ ПУТЯХ

Михаил Цинкер^{1,2}, Петр Трусов^{1,2}, Полина Свинцова^{1,2*}

¹ Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, ул. Монастырская, 82, г. Пермь, 614045, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: appolinaryasd@gmail.com

В рамках разработки комплексной математической модели дыхательной системы человека рассматривается подмодель, предназначенная для исследования течения воздуха в воздухоносных путях (ВП) человека. Рассматривается участок ВП от носовой полости до пятой генерации бронхов. Геометрия ВП построена на основе данных компьютерной томографии. Вдыхаемый воздух представлен многофазной смесью гомогенного газа и твердых пылевых частиц различных размеров и плотности. Воздух является несущей фазой, частицы – несомой фазой. Полагается, что пылевые частицы имеют сферическую форму. Рассматривается нестационарное течение воздуха, на входе в носовую полость задается постоянное атмосферное давление, на выходах из бронхов – законы изменения массовых потоков, определенные на основе детальной трехмерной подмодели течения воздуха в деформируемых легких человека. Стенки ВП, содержащие хрящевую ткань, полагаются твердыми недеформируемыми. На стенках задается условие оседания пылевых частиц. Численно получены скорости потока несущей фазы в различные моменты времени, траектории движения взвешенных частиц, зоны оседания частиц в ВП, количественные оценки доли частиц различных размеров (от 0,5 до 20 мкм) и плотности (от 1000 до 4000 кг/м³), оседающих в ВП. Полученные результаты по оседанию частиц в ВП качественно согласуются с результатами проведенного натурного эксперимента по исследованию распределения пылевых частиц в различных участках ВП человека. Информация о составе вдыхаемого воздуха является входными данными для подмодели течения воздуха в легких.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2025-0001).

АНАЛИЗ БИОМЕХАНИКИ ХОДЬБЫ АМПУТАНТОВ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ЗАХВАТА ДВИЖЕНИЙ

**Владимир Сердюков*, Татьяна Шашкина, Дарья Коростовская,
Софья Экшарова, Юлия Пещенюк**

Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

* e-mail: vsserd@gmail.com

Количественный анализ биомеханических показателей ходьбы ампутантов нижних конечностей является важной задачей для достижения максимальной эффективности использования ими протезов и оценки эффективности реабилитационного процесса. К сожалению, сегодня в практике протезирования слабо распространены методы, позволяющие проводить подобный анализ. Среди современных методов сбора данных о движении выделяются IMU-системы, так как они компактны и просты в использовании. Подобные системы могут быть эффективно использованы и в области протезирования.

В настоящей работе было проведено исследование возможностей применения IMU-систем для: 1) отслеживания влияния настроек протеза стопы на биомеханику ходьбы ампутанта; 2) отслеживания хода реабилитации ампутантов после постановки протеза.

Для исследования влияния положения протеза стопы на биомеханические показатели ходьбы ампутанта в работе проводилась настройка протеза в сагитальной и фронтальной плоскостях. Было показано, что настройки протеза могут значительно влиять на кинематику ходьбы ампутанта. Предложен алгоритм определения наиболее подходящей пациенту настройки протеза. Такая методика может быть использована в процессе реабилитации пациентов для определения наиболее эффективной настройки положения протеза.

Отслеживание хода реабилитации было проведено на транстибиальных (ампутация ниже колена) и трансфеморальных (ампутация ниже бедра) ампутантах. Показано, что в течение 2 недель биомеханические показатели пациентов значительно меняются, при этом информация, получаемая в ходе использования системы захвата движений, позволяет протезисту и пациенту лучше понять необходимые действия для устранения дефектов ходьбы.

В работе были использованы как коммерчески доступная, так и оригинальная разработанная система захвата движений и проведено сопостав-

ление их работы. Также в работе для быстрого анализа полученных данных был разработан автоматизированный алгоритм их обработки.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-71-00069, <https://rscf.ru/project/24-71-00069/>).

Пороговое значение единиц Хаунсфилда для прогнозирования потери стабильности фиксации сегмента L4–L5 позвоночника

Дмитрий Сидоренко*, Леонид Бессонов

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,
ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Россия

* e-mail: sid@sgu.ru

Декомпрессивно-стабилизирующие вмешательства с применением металлоконструкции являются распространенным методом лечения дегенеративных заболеваний позвоночника. Качество костной ткани позвонков имеет критическое значение для прогнозирования стабильности металлоконструкции. Единицы Хаунсфилда (Hu), оцениваемые по компьютерной томографии позвоночника, являются значимым фактором риска расшатывания транспедикулярных винтов, проседания межтелового кейджа. Известные пороговые значения Hu для оценки риска несостоятельности металлоконструкции на поясничном уровне отличаются высокой вариабельностью значений. Цель данной работы состояла в биомеханическом обосновании пороговых значений Hu для прогнозирования несостоятельности моносегментарного межтелового спондилодеза в сочетании с задней транспедикулярной фиксацией на нижнепоясничном сегменте L4–L5 позвоночника.

Проведено моделирование нагружения типовыми силами и моментами сегмента L4–L5 с установленными винтами и межтеловым заменителем. Модуль упругости и предел прочности губчатой кости варьировались и рассчитывались на основе Hu, которое меняли от 256 до 90 единиц. При Hu от 165 и выше максимальные напряжения в губчатой кости позвонков далеки от соответствующих пределов прочности. При Hu = 140 напряжения в случае флексии становятся выше предела прочности. При Hu = 125 напряжения при четырех вариантах нагружения превышают предел прочности.

Можно заключить, что Hu = 125 является пороговым значением Hu. С его помощью можно выявлять пациентов, у которых может возникнуть

нестабильность систем транспедикулярной фиксации поясничных позвонков вследствие ослабления прочностных свойств губчатой кости. При этом надо с осторожностью подходить к лечению пациентов, у которых Ни губчатой кости поясничных позвонков находятся в диапазоне от 125 до 140 единиц, так как и у них в определенных ситуациях может возникнуть повреждение костной ткани при декомпрессивно-стабилизирующих вмешательствах на нижнепоясничном уровне.

Исследование выполнено при поддержке Фонда содействия инновациям (проект № 5223ГСИ/91981 от 26.02.2024) и Государственного задания (проект FSRR-2023-0009).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРАЗНОЙ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ В СИСТЕМЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Рамиль Сираев*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: rrsiraev@pstu.ru

Полимеразная цепная реакция (ПЦР) представляет собой многократное избирательное копирование определенного участка нуклеиновой кислоты ДНК при помощи ферментов в искусственных условиях. Количество специфического продукта реакции теоретически возрастает пропорционально 2^n , где n – число циклов реакции. С начала 2000-х гг. продвигается технология конвективной ПЦР (CPCR) на основе естественной конвекции. Эта технология позволяет ускорить проведение реакции ПЦР, уменьшить масштабы амплификаторов до размеров микрореактора. Математические модели для анализа CPCR традиционно предполагают, что раствор ДНК является истинным раствором, то есть за основу берется гомогенная модель, в которой молекулы ДНК и растворитель движутся одинаково, как одна фаза, и соответственно описываются одним уравнением Навье – Стокса. Данный подход, несмотря на определенные успехи, имеет и некоторые недостатки. Возможны ситуации, когда молекулы раствора могут вести себя как отдельная дисперсная фаза: вращение раствора в неподвижном сосуде, действие электрического поля и т.п. В этом случае поведение фракций молекул ДНК может быть описано только в рамках многофазной модели жидкой среды. До данного времени такие модели для реакции конвективной ПЦР отсутствовали.

В настоящей работе на основе эйлерового метода для многофазных сред разработаны математическая и численная модели конвективной ПЦР. Одноцепочечные (ssDNA), двухцепочечные (dsDNA) и отоженных праймерами (aDNA) молекулы ДНК, представляют собой различные дисперсные фазы, между которыми идет реакция ПЦР. Численная модель реализована в пакете ANSYS CFX. С целью верификации проведено сравнение с результатами наиболее релевантных теоретических и экспериментальных работ в этой области. Показано, что модель хорошо работает: согласуются времена удвоения числа молекул ДНК, конфигурация и динамика полей.

Предложенная методика была применена для анализа ряда ситуаций, в которых гомогенные модели оказываются неработоспособными: вращение раствора в неподвижном сосуде и учет времени протекания реакции элонгации (delay effect).

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 25-11-00338).

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПЕРСИСТЕНТНЫХ ГОМОЛОГИЙ И ДАННЫХ ВИДЕОФИКСАЦИИ

Виктория Смирнова*, Елена Семенова, Оскар Саченков

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
ул. Кремлёвская, 18, корп. 1, г. Казань, 420008, Россия

* e-mail: yaikovavictoriya@mail.ru

В работе рассматривается применение персистентных гомологий и топологического анализа данных для кластеризации пациентов на основе видеофиксации их движений во время выполнения теста Ромберга. Основная цель исследования заключается в разработке методологии анализа динамических характеристик пациентов с использованием современных методов компьютерного зрения и топологического анализа.

Исследование проводилось на базе Казанского федерального университета, где были отсняты видеозаписи 14 испытуемых (7 мужчин и 7 женщин). Съемка осуществлялась с частотой 60 кадров/с в двух режимах: с открытыми и закрытыми глазами. Разработанный программный комплекс позволял выполнять покадровую обработку видео, определять ключевые точки тела и рассчитывать четыре основных угла: отклонение руки от горизонтали, прогиб в поясничном отделе, угол в грудном отделе и отклонение головы от вертикали.

Для анализа полученных временных рядов углов использовалась фильтрация Морса, которая позволила построить диаграммы персистентности для каждого пациента. Дальнейшая кластеризация диаграмм выполнялась с использованием расстояния Вассерштейна и иерархического кластерного анализа. Это позволило разделить пациентов на группы с характерными паттернами движений.

Результаты исследования показали статистически значимые различия в углах между тестами с открытыми и закрытыми глазами для некоторых пациентов. При закрытии глаз наблюдались компенсаторные движения, выражавшиеся в изменении углов в грудном и поясничном отделе, а также в увеличении колебаний угла отклонения от вертикали.

Полученные результаты демонстрируют эффективность применения персистентных гомологий для анализа медицинских видеоданных и кластеризации пациентов по характерным паттернам движений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023-0009.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АККОМАДАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ХРУСТАЛИКА С ПОМОЩЬЮ ПОДВИЖНЫХ ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ

**Денис Краснов ¹, Аркадий Соловьев ^{2,3,4*}, Мария Германчук ^{2,4},
Александр Епихин ⁵**

¹ Южный федеральный университет, ул. Большая Садовая, 105, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

² Крымский инженерно педагогический университет имени Февзи Якубова, пер. Учебный, 8, г. Симферополь, 295015, Республика Крым, Россия

³ Крымский инженерно педагогический университет имени Февзи Якубова, пер. Учебный, 8, г. Симферополь, 295015, Республика Крым, Россия

⁴ Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, пр. Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, Республика Крым, Россия

⁵ Ростовский государственный медицинский университет, пер. Нахичеванский, 29, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

* e-mail: solovievarc@gmail.com

Целью данного исследования является математическое моделирование взаимодействия искусственного хрусталика в виде двух линз с упругими гаптическими частями с интраокулярным мешком и цилиарным телом.

Моделирование проводится в рамках линейной теории упругости и механики криволинейных стержней. Для численного решения краевых задач применяется метод конечных элементов (МКЭ) реализованный в пакете ANSYS. Вначале исследуются деформационные характеристики гаптических элементов в виде криволинейных стержней и интраокулярного мешка, который моделируется оболочкой вращения. Затем численно решается контактная задача взаимодействия гаптических элементов линз и интраокулярного мешка. В результате выбирается жесткость этих элементов (форма, кривизна, поперечное сечение), которая обеспечивает достаточное для аккомодации осевое движение оптической части линзы.

Таким образом, разработанная математическая и компьютерная модель и расчеты, проведенные на их основе, позволяют выбрать оптимальную конструкцию искусственного хрусталика с возможностью аккомодации, применение которых в лечебной практике существенно увеличит качество имплантов.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-02-2025-1543.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ БИОПЕЧАТИ ГИДРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОЛЛАГЕНА МОРСКИХ ОРГАНИЗМОВ

**Дарья Спорышева ^{1*}, Илья Виндокуров ¹,
Михаил Ташкинов ¹, Юлия Куликова ²**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

²Балтийский федеральный университет имени И. Канта,
ул. Александра Невского, 14, г. Калининград, 236000, Россия

* e-mail: disporysheva@pstu.ru

Гидрогели на основе коллагена морских организмов являются перспективным материалом для тканевой инженерии и регенеративной медицины благодаря высокой биосовместимости, низкой иммуногенности и экологичности, поскольку их получают из отходов переработки рыбы и беспозвоночных. Такие гидрогели применяются для создания двухслойных кожных моделей, каркасов для регенерации хрящевой ткани с сохранением фенотипа хондроцитов, а также биоактивных покрытий с антимикробными свойствами. Основные методы производства включают ферментативное сшивание коллагена и использование смесей альгината с коллагеном для

3D-биопечати, что обеспечивает стабильность структуры и поддерживает жизнеспособность клеток. Применение 3D-печати открывает возможности для создания персонализированных имплантатов, при этом важнейшей характеристикой является вязкость, определяющая микроструктуру гидрогеля. В настоящее время для прогнозирования поведения новых материалов в организме активно исследуются такие характеристики напечатанных изделий, как набухание, микроструктура, механические свойства, гидрофильность, скорость деградации и методы стерилизации.

В данной работе были изготовлены гидрогели на основе коллагена медузы, семги, сельди и салаки. Проведен подбор параметров 3D-биопечати для каждого типа геля с целью достижения текстуры, пригодной для однослойной и многослойной печати объектов различной геометрии. Проведена оценка геометрических характеристик полученных образцов: размеры образцов до и после затвердевания, пропечатывание геометрических фигур, печать мостов.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

**Вероника Струкова*, Анна Каменских,
Юрий Носов, Дмитрий Пустовалов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: Veloiv_pstu@mail.ru

Внедрение аддитивных технологий в биомедицине для создания индивидуализированных протезов, имплантатов и ортопедических устройств, которые точно соответствуют анатомическим особенностям пациентов, является одним из основных направлений развития отрасли¹. Но многообразие технологий и расширение номенклатуры материалов ставит перед исследователями задачу подбора технологических режимов для печати прототипов требуемого качества, а также материалов под требуемые функции с высокой эффективностью.

В рамках работы выделено более 10 фотополимерных смол отечественного и зарубежного производства для сравнительного анализа техноло-

¹ Effect of duplication techniques on the fitting accuracy of CAD-CAM milled, and Injection-Molded mandibular complete denture bases / A.-N.M. Emam, A.A. El-Esawy, M.H. Alyami, Y. Baraka, M.M. Gad, M.A. Helal // Dentistry Journal. – 2021. – Vol. 12, iss. 2. – Art. 32.

гического процесса аддитивного выращивания прототипов для литья по выжигаемым моделям и анализа теплофизики и термомеханики фотополимеров после отверждения. Рассматриваются фотополимеры разных фирм: HarzLabs, Gorky Liquid, JANG HE, Anycubic и др. Время экспозиции, толщина слоя, угол печати, поддерживающие структуры и другие факторы оказывают значительное влияние на качество итоговой модели. Установлено, что рекомендации производителей не позволяют получить образцы требуемого качества за адекватное время печати. Анализ влияния настроек печати выполнен с использованием DLP принтера Anycubic Photon Mono m7 pro (длина волны 450 нм). Например, в ходе исследования выявлено, что рациональное время экспозиции для HarzLabs Cast-Chery составляет 6 с, что в 5,83 раза меньше, чем рекомендации производителя. Выполнена систематизация данных о технологических режимах печати для набора фотополимерных смол и сравнительный анализ параметров технологического процесса и качества моделей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Пермского края, соглашение от 26.02.2025 г. № С-26/940.1.

ПРОТОТИП БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА РУКИ ЧЕЛОВЕКА

Андрей Сырвачев*, Елена Кротова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: an.sirvacheff@yandex.ru

Актуальность разработки обусловлена высокой потребностью в функциональных протезах для пациентов с ампутациями конечностей. Современные бионические решения позволяют восстановить утраченные функции и улучшить качество жизни. Цель проекта – создание доступного прототипа протеза с открытой архитектурой.

Методы и материалы. Аппаратная часть включает:

1. Микроконтроллер Arduino Nano.
2. ЭМГ-датчики AD8232 для регистрации мышечных импульсов.
3. Сервоприводы (4 шт.) для движения пальцев.
4. 3D-печатный корпус из пластика.

Программное обеспечение разработано в среде Arduino IDE на языке С. Для обработки сигналов ЭМГ использованы алгоритмы фильтрации и преобразования данных в управляющие команды.

Прототип реализует:

1. Движение пальцев (захват, сжатие).
2. Имитацию тактильных ощущений через вибромотор.
3. Стоимость компонентов составила 4533 рубля.

Таким образом, разработан функциональный прототип, демонстрирующий возможность создания доступных бионических протезов. Перспективы работы включают доработку системы обратной связи и интеграцию с нейроинтерфейсами.

Ссылка на облачное хранилище с проектом: <https://disk.yandex.ru/d/bp5IDP0reSt-Bw>

ДИЗАЙН ПОРИСТЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ ИЗ СПЛАВА Ti-6Al-4V, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

**Артём Творогов*, Вячеслав Лезин,
Станислав Чернышихин, Вадим Шереметьев**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский пр-кт, 4, стр. 1, г. Москва, 119049, Россия

* e-mail: arrrttv@gmail.com

Пористые материалы из титановых сплавов, получаемые методом селективного лазерного плавления (СЛП), широко распространены в конструкциях персонализируемых ортопедических имплантатов с повышенной биологической и биомеханической совместимостью. Управление свойствами таких материалов обеспечивается путем задания конструкции ячеистых и стохастических пористых структур (ПС). Настоящая работа посвящена изучению закономерности влияния задаваемых параметров ПС на макроструктуру и механические свойства пористых биоматериалов, полученных методом СЛП из сплава Ti-6Al-4V, с целью повышения общего комплекса эксплуатационных характеристик персонализируемых ортопедических имплантатов.

В качестве основных требований для создания ПС на основании анализа литературы выбраны следующие: пористость > 65 %, толщина конструктивных элементов (перемычек) 250–340 мкм, размер основных пор > 900 мкм. Для создания ячеистых ПС в качестве элементарной ячейки (ЭЯ) выбран ромбоэдрический додекаэдр (РД), при дизайне которого задаваемыми параметрами являются размер ЭЯ и толщина перемычки. В стохастических ПС на основе полиэдра Вороного (тип В) создание

уникальной конструкции обеспечено путем задания требуемого размера пор, толщины перемычки и параметра *organic factor*.

Установлено, что отклонение конструкционной пористости полученных образцов в меньшую сторону от модели составляет 8–15 % для РД и менее 4 % для В. Уменьшение размеров основных пор достигает 200–300 мкм. Модуль Юнга в зависимости от пористости образцов с ячейкой типа РД линейно снижается в диапазоне 1,3–3,7 ГПа при уменьшении толщины перемычек. Образцы типа В имеют модуль Юнга 0,9–2,3 ГПа и при варьировании одного параметра меняются нелинейно. Условный предел текучести у образцов типа РД имеет аналогичные зависимости, как у модуля Юнга в диапазоне 40–160 МПа. При изменении одного параметра ПС типа В условный предел текучести серий образцов изменяется линейно от 20 до 90 МПа.

Работы выполнены при поддержке проекта РНФ № 22-79-10299, <https://rscf.ru/project/22-79-10299/>.

РАЗРАБОТКА И БИМЕДИЦИНСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛЛАГЕН-ПОЛИЛАКТИДНЫХ КОМПОЗИТОВ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ *IN VITRO* И *IN VIVO*

Нина Тимофеева*, Сандаара Захарова, Светлана Артахина

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
Белинского, 58, г. Якутск, 677000, Россия

* e-mail: ninakswan@mail.ru

Актуальным направлением в области биомедицинских материалов является разработка новых полимерных композитов для регенеративной медицины. Одним из перспективных материалов для решения задач тканевой инженерии является полилактид (ПЛА). Биосовместимость, биоразлагаемость, отсутствие токсического эффекта на организм определяют его возможное применение в медицинской практике. Однако ПЛА является относительно гидрофобным полимером, что может препятствовать развитию и росту клеточных культур на его поверхности. В связи с этим в данной работе предложен способ модификации ПЛА гидролизатом коллагена, полученным из плавательного пузыря северных рыб для повышения клеточного ответа и улучшения показателей регенерации тканей.

Объектами исследования являются полилактид 4043D NatureWorks (США) и гидролизат коллагена, полученный из плавательного пузыря

омуля, обитающего на территории Республики Саха (Якутия). Для исследований *in vivo* были использованы человеческие фибробласты (2-й пассаж), в качестве модели живого организма были выбраны лабораторные крысы линии Wistar массой 300 г.

Тонкие пленки регулируемой толщины от 10 до 100 мкм из ПЛА были получены методом экструзии на экструдере Brabender (Германия). Далее пленки были модифицированы 1 и 3 % раствором гидролизата коллагена. Проведены физико-механические, структурные и биотехнологические методы исследования образцов.

В результате было выявлено повышение прочностных показателей и показателей адгезии клеток от более толстых к более тонким пленкам ПЛА, показано распределение коллагена на поверхности образцов, которое способствует равномерному прикреплению клеток на поверхности образцов. В результате *in vivo*-исследований зафиксирована биodeградация ПЛА спустя 3 и 6 месяцев исследования, обнаружены новые гидроксильные группы на ИК-спектрах у извлеченных образцов. На микрофотографиях СЭМ показано изменение морфологии поверхности образцов до и после имплантации.

СОЗДАНИЕ БИОМИМЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УСКОРЕННОГО ЗАЖИВЛЕНИЯ РАН НА ОСНОВЕ ПОЛИ-3-ГИДРОКСИБУТИРАТА, ГЕМИНА И ФИБРИНОГЕНА

Полина Тюбаева^{1,2*}, Иветта Варьян^{1,2}, Анатолий Попов^{1,2}

¹ Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН, ул. Косыгина, 4,
г. Москва, 119334, Россия

² Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова,
Стремянный переулок, 36, г. Москва, 115054, Россия

* e-mail: polina-tyubaeva@yandex.ru

Полимермодифицирующая добавка – белковая молекула, ускоряющие заживление ран на ранних стадиях, является примером сложной комплексной задачи, для решения которой предлагается множество подходов. Волокнистые полимерные материалы активно используются в биомедицине благодаря, во-первых, высокой степени сходства с тканями живого организма и, во-вторых, возможности простой и эффективной модификации таких материалов для придания им особых свойств.

Средний период регенерации для неинфицированной кожной раны составляет порядка 15 дней, где принято выделять 4 ключевых этапа заживления раны: коагуляцию (до одного дня), воспаление (от одного до 3,5 дня), пролиферацию клеток и эпителизацию (от 1,5 до 13 дней) и ремоделирование раны (от 5 дней до конца заживления). Наиболее частая причина увеличения сроков заживления заключается в бактериальной инфекции. Таким образом, ранозаживляющий материал должен являться поставщиком дополнительных белковых активаторов ранозаживления на протяжении всей фазы коагуляции, а также на этапе фазы воспаления обеспечивать высокую антимикробную активность. Кроме того, в области поврежденной ткани необходимо обеспечить удаление клеточного мусора путем выработки и высвобождения протеаз и активных форм кислорода. С учетом всех этих требований были выбраны комбинация полимера, модифицирующей добавки и белка-активатора ранозаживления: поли-3-гидроксibuтират, гемин и фибриноген.

В работе были исследованы системы, включая антимикробные, прочностные, морфологические и другие характеристики. Была продемонстрирована равномерная локализация активатора ранозаживления, высокая биосовместимость системы (более 90 %), а также были проведены исследования заживления ран у лабораторных мышей, включая цитологические исследования и анализ крови. Полученные системы для регенеративной медицины позволили ускорить заживление раны на 35 % на 3-й день, продемонстрировали впечатляющее качество гистологии и отсутствие иммунного ответа.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАМАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ Р ПОВЕРХНОСТЕЙ

**Михаил Фролов ^{1*}, Михаил Смольков ^{1,2},
Александр Бурчаков ¹, Александр Крутов ^{1,2}**

¹ Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская, 244,
г. Самара, 443100, Россия

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
ул. Льва Толстого, 23, г. Самара, 443010, Россия

* e-mail: panosonig@mail.ru

В настоящее время растет интерес к так называемым трех-периодическим поверхностям (ТПП). Это связано с тем, что структуры, основанные на ТПП, обладают привлекательными механическими и геометриче-

скими свойствами: высокими пористостью и удельной поверхностью; наличием связанных пор, которые необходимы для создания биологических имплантов. В работе¹ авторами был предложен новый метод построения ТПП на основе атомных сеток природных кристаллов – цеолитов. Целью данной работы является исследование механических свойств новых пористых структур на основе поверхностей CGF, HEU и SAS, полученных из атомных сеток соответствующих цеолитов. Построение экспериментальных образцов осуществлялось методами 3D-печати с использованием полилактида PLA+, имеющим следующие свойства: плотность 1,24 г/см³, модуль сжатия 2000 МПа, предел текучести 60 МПа, предел прочности 70 МПа. Печать производилась на 3D-принтере Bambu Lab X1 Carbon. Были получены пористые образцы, имеющие трансляцию в трех ортогональных направлениях 2×2×2, 3×3×3 и 4×4×4. Элементарная ячейка представляла собой куб с ребром 20 мм. Толщина стенок структур составляла 2 мм. Механические испытания проводились на стенде ИР 5143-200-11. Скорость сжатия составляла 2 мм/мин, относительная погрешность измерений не превышала 0,01 %.

В итоге были получены значения предела текучести 68,08 и 64,72 МПа для HEU и CGF. Пределы прочности составили 75,64 и 65,25 МПа соответственно. Данные значения в среднем на 8 % превышают значения PLA+ материала.

Работа выполнена в рамках гранта 25-23-00123.

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ПРОТОТИПА

Данил Хамзин*, Олег Герасимов, Оскар Саченков

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
ул. Кремлёвская, 18, корп. 1, г. Казань, 420008, Россия

* e-mail: kde1260@gmail.com

Оптимизация структуры в современном проектировании проводится за счет топологической оптимизации, а она, в свою очередь, представляет

¹ Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces / A.V. Eremin, M.A. Frolov, A.F. Krutov, M.I. Smolkov, A. Shulga, D. Bragin, A. Popov, V.A. Blatov // Mech. Adv. Mat. Struct. – 2024. – Vol. 32. – P. 11320–11336. DOI: 10.1080/15376494.2024.2303724

собой математический метод, позволяющий оптимизировать распределение материала в заданном объеме при определенных условиях нагрузки и ограничениях. В контексте цифрового прототипирования данный подход приобретает особое значение, поскольку позволяет значительно сократить время разработки, уменьшить вес изделия и снизить стоимость производства биомедицинских конструкций.

Метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) является одним из наиболее эффективных алгоритмов топологической оптимизации, основанным на варьировании плотности материала в элементах конструкции с последующим штрафованием промежуточных значений. Применение данного метода в сочетании с технологиями цифрового прототипирования открывает новые возможности для создания персонализированных биомедицинских изделий, что особенно актуально при разработке ортопедических имплантатов, протезов и ортодонтических конструкций.

В настоящей работе исследуются возможности интеграции метода SIMP с технологиями цифрового прототипирования для достижения оптимальных параметров биомедицинских конструкций на ранних этапах проектирования. Рассмотрена задача трехточечного изгиба балки. Для решения данной задачи был использован метод конечных элементов с тремя видами сеток. Для каждой сетки рассмотрено две постановки задачи. В результате численного расчета получена итоговая геометрия биомедицинского изделия и была подсчитана жесткость. Объем изделия, независимо от выбора сетки, уменьшился на 60 %, потеря жесткости при этом составила от 17,9 до 25,2 %, что позволяет создавать более легкие имплантаты без существенной потери функциональности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023-0009.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИМПЛАНТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО PLA

Рушан Хасянов ^{1*}, Михаил Ташкинов ²

¹ ООО «НПО “ЗД Солюшнс”», проезд 4922-й, г. Зеленоград, 124498, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: info@npo3ds.ru

Доклад посвящен разработке композиционных материалов на основе модифицированного полилактида (PLA) и технологий их переработки для аддитивного производства (3D-печати) индивидуальных, анатомически точных биоразлагаемых имплантатов. Главной задачей является создание материала и изготовление изделий, которые после выполнения своей функции полностью рассасываются и выводятся из организма без необходимости повторной хирургической операции по удалению. Принципиальным преимуществом подхода является сочетание индивидуализации имплантата под конкретного пациента, достижимой благодаря 3D-печати по данным КТ/МРТ, и программируемой биоразрушаемости материала. Ключевым аспектом технологии является направленная модификация PLA путем введения биоактивных наполнителей (таких как гидроксиапатит, трикальцийфосфат, биоактивные стекла) и/или пластификаторов, что позволяет одновременно: 1) существенно улучшить механические свойства (прочность, ударную вязкость) для соответствия нагрузкам в месте имплантации; 2) обеспечить необходимую биосовместимость и остеоинтеграцию; 3) достичь заданной скорости и полноты биodeградации, синхронизированной с процессом регенерации тканей. Рассматриваются особенности технологии FDM (моделирование методом послойного наплавления) для печати сложных индивидуальных имплантов из композитов PLA, включая управление параметрами процесса (температура, скорость, заполнение, пористость) для оптимизации структуры изделия и его биологических свойств. Представлены результаты разработки таких имплантов, как индивидуальные костные пластины, фиксаторы и каркасы для тканевой инженерии, демонстрирующие контролируемую резорбцию *in vitro* и *in vivo*, а также их функциональную эффективность.

ВЛИЯНИЕ РЕНТГЕНОКОНТРАСТНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА

Александр Хмелевский ^{1,2*}, Никита Князев ¹, Всеволод Побежимов ¹,
Александр Несмелов ¹, Алексей Ступников ¹, Петр Дмитриков ¹,
Сергей Малахов ¹, Денис Брешенков ³, Эдуард Чарчян ³,
Артур Крупнин ^{1,4}

¹ НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, г. Москва, 123182, Россия

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский переулок, 9, г. Долгопрудный, 115184, Россия

³ Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского, Абрикосовский пер., 2, 119435, г. Москва Россия

⁴ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, 5, г. Москва, 105005, Россия

* e-mail: alexgood93@mail.ru

В современной медицине активно используются полимерные биоматериалы, среди которых важное место занимает полилактид – биосовместимый биоразлагаемый полиэфир. Одним из его существенных недостатков является отсутствие рентгеноконтрастности, что затрудняет визуализацию и контроль поведения имплантируемых медицинских изделий на его основе *in vivo*.

Использование композиционных материалов с рентгеноконтрастными наполнителями позволяет решить эту проблему. Сульфат бария (BaSO_4) является биосовместимым минеральным веществом, активно применяющимся в медицине в качестве контрастирующего агента при рентгенокопии.

В рамках данной работы с применением различных физико-химических методов проведен комплексный анализ влияния концентрации BaSO_4 на механические, теплофизические и физико-химические свойства рентгеноконтрастных композиционных материалов на основе полилактида. Показано, что полученные материалы могут быть использованы для создания персонализированных медицинских изделий со сложной структурой методом экструзионной 3D-печати.

Работа проведена частично в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (изготовление образцов и их характеристикация). Работа проведена частично в рамках соглашения от 08.04.2025 г. № 350-ЭА-25-ХТ между НИЦ «Курчатовский институт» и ФГБНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского» (проведение диагностических исследований).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЗВОНОЧНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО СЕГМЕНТА L4–L5 С УЧЕТОМ СВЯЗОК: ГИПЕРРЕЦЕПЦИЯ В ФАСЕТОЧНОМ СУСТАВЕ

Денис Хорошев*, Олег Ильялов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: horosh-den@mail.ru

Врачебная практика показывает, что в половине случаев гиперрецепция в пояснице связана с подвывихом фасеточных суставов. С нашей точки зрения, это связано с перераспределением нагрузки в позвоночно-двигательном сегменте при дегенеративном уменьшении высоты межпозвоночного диска. Вследствие этого при значительной по величине нагрузке происходит подвывих фасеточных суставов. В итоге деформация суставных сумок и изменение площади контакта между отростками приводят к изменению давления на отростках и вынуждают близлежащие барорецепторы подавать сигналы о наличии гиперрецепции в сегменте. Цель исследования – используя методы биомеханического моделирования, оценить влияние учета связок в позвоночно-двигательном сегменте L4–L5 на возникновение подвывиха фасеточных суставов (в зависимости от величины осевой сжимающей нагрузки). Построена трехмерная биомеханическая модель сегмента L4–L5 пациента N в возрасте 22 лет, которая включает в себя два позвонка L4 и L5, межпозвоночный диск, два фасеточных сустава и девять видов связок. Анализ литературы по моделированию сегмента в статье показал, что для всех работ характерно упрощенное моделирование фасеточных суставов. Описана постановка задачи в сочетании упругой задачи и задачи об идеальной жидкости для сегмента L4–L5. В качестве первого приближения предполагается использовать теорию упругости для оценки функционирования модели. Значения физических характеристик модели представлены в раннем исследовании. Текущая постановка задачи моделирует травматичное нагружение позвоночно-двигательного сегмента L4–L5, при котором появляется подвывих фасеточных суставов. В качестве допущения синовиальная жидкость принята идеальной жидкостью. Связки считаются пружинами. Нижняя поверхность тела позвонка L4 жестко закреплена, а на верхнюю поверхность позвонка L5 действует нагрузка P_1 . На внешней поверхности пульпозного ядра приложено внутридисковое давление $P_2 = 330$ кПа. На границе взаимодействия твердых тел и жидкости задано равенство сил. Поставленная задача решена при помощи Ansys Workbench. Получены распределения перемещений и деформаций.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЫХАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА: ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЛЕГКИХ

Михаил Цинкер ^{1,2*}, Петр Трусов ^{1,2}, Владислав Нурисламов ^{1,2}

¹ Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками
здоровью населения, ул. Монастырская, 82, г. Пермь, 614045, Россия

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: cinker@fcrisk.ru

В рамках разработки комплексной математической модели дыхательной системы человека предлагаемая работа посвящена вопросам, связанным с исследованием течения воздуха в легких человека. Легкие человека, образованные мелкими дыхательными путями и альвеолами с содержащимся в них воздухом, моделируются сплошной упругодеформируемой насыщенной пористой средой. Решается совместная задача упругого деформирования насыщенной пористой среды легких, испытывающих большие градиенты перемещений, и фильтрации воздуха через деформируемую пористую среду (за счет перепада давления). Получены разрешающие соотношения метода конечных элементов для решения подзадачи деформирования и метода конечных объемов для подзадачи фильтрации. Алгоритм реализации модели предполагает использование пошаговой процедуры. Восстановление трехмерной геометрии легких выполнялось на основе томографических снимков. Предложен закон движения стенок, используемый в качестве кинематических граничных условий. В результате численного решения связанной задачи течения воздуха в упругодеформируемой пористой среде легких получено пространственное распределение параметров легочной ткани и воздушной фазы в разные моменты дыхательного цикла, в том числе – поля перемещений, скоростей перемещений, деформаций, напряжений, потоков воздуха. Результаты, полученные из подмодели движения воздуха в легких, используются в качестве граничных условий для подмодели течения воздуха в верхних воздухоносных путях.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2025-0001).

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРОВИ И МЕТОДЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Нагим Шакиров*, Андрей Судаков

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
ул. Академика Королева, 1, г. Пермь, 614013, Россия

* e-mail: shakirov@icmm.ru

Цельная кровь представляет собой многофазную среду, состоящую из взвешенных в плазме клеточных элементов, водного раствора органических молекул, белков и соли. Клеточная фаза крови включает эритроциты, лейкоциты и тромбоциты. Реологические свойства крови зависят от уровня в ней холестерина, фибриногена и эритроцитов [1; 2]. Эритроциты оказывают наибольшее влияние на кривую течения крови. Следует отметить, что их влияние на вид кривой течения крови значительно больше при низких скоростях сдвига, чем при высоких [3; 4]. Большая часть известных работ, посвященных реологическим измерениям вязкости крови, были выполнены в условиях стационарного сдвигового течения [5–7]. В настоящей работе исследуются уравнения состояния, учитывающие вязкие, упругие и тиксотропные свойства крови. Обсуждаются вопросы моделирования реологического поведения крови ее возможными аналогами, применение регрессивного анализа для аппроксимации кривой течения крови, полученной для узкого диапазона скоростей и напряжений сдвига. Анализируются методы определения предела текучести и ошибки при его вычислении. Иллюстрируется неоднозначность в выборе определяющих уравнений для описания кривой течения крови. Описывается тиксотропное поведение крови.

Список литературы

1. Левтов В.А., Регирер С.А., Шадрин Н.Х. Реология крови. – М.: Медицина, 1982. – 272 с.
2. Муравьев А.В., Чепоров С.В. Гемореология (экспериментальные и клинические аспекты реологии крови). – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2009. – 178 с.
3. The rheology of human blood—measurement near and at zero shear rate / G.R. Cokelet, E.W. Merrill, E.R. Gilliland, H. Shin // Trans. Soc. Rheol. – 1963. – Vol.7. – P.303–317.

4. Fisher D.T., Boger D.B., Scales P.J. Measurement errors in yield stress rheometry that arise from torque auto zero // *Appl.Rheol.* – 2006. – Vol.16, № 4. – P.206–209.

5. A review of hemorheology: Measuring techniques and recent advances / P.C. Sousa, F.T. Pinho, M.A. Alves, M.S.N. Oliveira // *Korea-Australia Rheology J.* – 2016. – Vol.28, № 1. –P.1–22.

6. Campo-Deano L., Oliveira M.S.N., Pinho F.T. A review of computational hemodynamics in middle cerebral aneurysms and rheological models for blood flow // *Appl. Mech.Rev.* – 2015. – Vol. 67. – P.1–16.

7. Тихомирова И.А. Реология крови и микроциркуляция // *Успехи физиологических наук.* – Т. 54, № 1. – С.3–25.

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЭФФЕКТИВНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ПОРИСТЫХ СТРУКТУР

Александр Шалимов*, Михаил Ташкинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: Shalimov96@pstu.ru

В настоящее время наблюдается быстрое развитие проектирования конструкций с различной структурной архитектурой для улучшения прочностных и жесткостных характеристик изделий. В зависимости от типа архитектуры в структурных связях на микромасштабном уровне могут возникать разрывы и микротрещины. Они могут возникать под действием внешней нагрузки, вследствие накопления повреждения при эксплуатации или быть там изначально из-за производственного дефекта. Поэтому изучение отдельных участков микроструктуры является актуальной проблемой.

Разрушение можно рассматривать как на макромасштабном уровне (размер изделия), так и на микромасштабном уровне (размер компонентов изделия). В данной работе рассматриваются представительные объемы двухфазных пористых структур с решетчатой и случайной геометрией

размерами 4'4'4 мм³. В качестве решетчатой трехмерной геометрической модели была выбрана структура на основе ОЦК ячейки периодичности, а в качестве случайной – двунепрерывная структура открытого типа на основе функции случайных гауссовых полей. Целью данной работы является изучение процессов механического поведения представительных объемов пористых структур при локальном разрушении отдельных элементов их микроструктуры. Такие повреждения были смоделированы при использовании конечно-элементного анализа с помощью исключения из расчета всех конечных элементов, принадлежащих исследуемым лигаментам (т.е. удаление лигамента из геометрической модели). В качестве исследуемых параметров используются эффективная жесткость представительного объема структур и коэффициент концентрации напряжений, который представлен в виде функциональной зависимости от расстояния до поврежденного лигамента. Таким образом, можно ответить на вопрос: как сильно локальное разрушение в структуре повлияет на эффективное механическое поведение всего представительного объема.

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект FSNM-2025-0001).

АНАЛИЗ РИСКОВ СОСУДИСТЫХ ОСЛОЖНЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АППАРАТА ИЛИЗАРОВА МОДИФИКАЦИИ БАГИРОВА НА ГОЛЕНИ

Леонид Бионышев^{1, 2}, Марина Шмурак^{2*}

¹Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова, ул. Приорова, 10, г. Москва, 127299, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект, 29, г. Пермь, 614990, Россия

* e-mail: shmurak2007@yandex.ru

При лечении ортопедических патологий и переломов нижних конечностей, фиксация костных фрагментов часто осуществляется с применением аппаратов для наружного остеосинтеза. Аппараты наружной фиксации (АНФ), такие как аппарат Илизарова, модификация Багирова, требуют

строгого соблюдения рекомендаций по технике установки с учетом безопасных зон монтажа фиксаторов. Ключевой риск при установке АНФ на голень – повреждение магистральных сосудов, которое может привести к ишемии или некрозу мягких тканей¹.

Целью работы является исследование анатомических соотношений элементов АНФ модификации Багирова с сосудами голени и анализ возможных гемодинамических изменений при установке элементов АНФ за пределами безопасных зон.

По данным томографического исследования построена 3D-модель артерий голени. На основе топографии нервно-сосудистых пучков и подкожных вен определены безопасные, нежелательные и запретные зоны для установки фиксаторов на 3 уровнях голени. Модель интегрирована с виртуальной конструкцией АНФ Багирова. Проведено численное моделирование кровотока при скоростях входящего потока 20, 40, 60 м/с. Проанализированы гемодинамические показатели в сегментах артерий и установлены критические анатомические структуры на каждом уровне. Результаты моделирования показали значительное снижение скорости кровотока (на 30–40 %) и массового расхода в артериях голени при сужении их просвета на 50 % из-за возможной установки элементов АНФ в нежелательные и запретные зоны.

Полученные результаты позволили разработать алгоритмы оценки рисков развития сосудистых осложнений при установке АНФ на голень и уточнить требования к позиционированию компонентов с учетом локализации дефекта и компоновки АНФ.

¹ Эффективность модифицированных компоновок аппаратов наружной фиксации при устранении варусной деформации голеней / А.Б. Багиров, К.А. Лаймуна, Н.А. Шестерня, Б.Д. Алинагиев, П.Н. Суварлы // Политравма. – 2021. – № 2. – С. 50–59. DOI: 10.24412/1819-1495-2021-2-50-59

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКСОСКЕЛЕТОВ

**Андрей Яцун ¹, Ирина Привалова ²,
Мария Щербакова ^{1*}, Андрей Лысых ²**

¹ Юго-Западный государственный университет,
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Россия

² Курский государственный медицинский университет,
ул. Карла Маркса, 3, г. Курск, 305000, Россия

* e-mail: 5-storm-7@mail.ru

Промышленные экзоскелеты становятся всё более популярными и используются для снижения физической нагрузки на работников физического труда, однако всё ещё существует необходимость в разработке комплексных критериев для оценки их эффективности.

Одним из инструментов, позволяющих оценить эффективность применения экзоскелета, является ЭМГ, она позволяет объективно измерять электрическую активность мышц, что является одним из ключевых показателей нагрузки на организм при выполнении трудовых задач с экзоскелетом и без него.

Оценка эффективности экзоскелета проводится через моделирование трудовой деятельности, включающее подъем и опускание груза предельно допустимой нормы подъема тяжестей для мужчин, которые выступали в качестве добровольных испытуемых. Регистрация ЭМГ осуществляется в реальном времени для анализа мышечной активности.

Основные критерии для оценки включают: уменьшение амплитуды ЭМГ в мышечной группе спины (обусловлено спецификой экзоскелета); снижение уровня усталости, измеряемое через динамику ЭМГ; анализ соотношения между активностью мышечной группы спины при использовании экзоскелета и без его использования. Данные критерии позволяют выявить изменения в мышечной активности, которые указывают на степень разгрузки и эффективность экзоскелета.

Комплексный подход к оценке эффективности промышленных экзоскелетов, основанный на регистрации ЭМГ, ЭКГ, спирограммы и анкетировании, позволит создать более безопасные и эффективные условия труда для работников, а также получить более полное представление о физиологическом состоянии работников и субъективной оценке их комфорта при использовании экзоскелета.

Полученные данные помогут в дальнейшем улучшить экзоскелеты, снижая физическую нагрузку и повышая безопасность на рабочем месте.

РАЗРАБОТКА БИОСОВМЕСТИМОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

Арсений Фашевский ¹, Екатерина Лазарева ^{1,2}, Артем Мыльников ³,
Никита Наволокин ³, Ирина Янина ^{1,2*}

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Россия

² Томский национальный исследовательский государственный университет,
проспект Ленина, 36, г. Томск, Россия

³ Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского,
ул. Большая Казачья, 112, г. Саратов, 410012, Россия

* e-mail: irina-yanina@yandex.ru

Функционализированные апконверсионные наночастицы (АКНЧ) представляют собой один из перспективных материалов для развития методов фотодинамической терапии. Сшивка фотодинамического красителя с оболочкой наночастиц требует дополнительного покрытия их поверхности. Нанооболочки сывороточного альбумина биосовместимы со многими типами клеток в широком диапазоне концентраций, легко усваиваются клетками, неиммуногенны и имеют длительный период полураспада в кровотоке.

Целями исследования стало разработать и синтезировать комплекс субмикронного масштаба, содержащего апконверсионную частицу, альбумин и молекулу фотосенсибилизатора, а также проверить биосовместимость комплекса с использованием гистологического анализа.

АКНЧ $[\text{NaYF}_4: \text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}]$ были синтезированы нами гидротермальным методом. Использовали АКНЧ, покрытые оболочками из человеческого сывороточного альбумина и цианина 3В NHS-эфира (Cy3). Концентрация АКНЧ составляла 2 мг/мл. Объем однократного введения крысе составлял 0,9–1,116 мл.

Работа выполнена на контрольной группе 20 лабораторных животных (самцы белых крыс породы Wistar массой 300 ± 50 г) *in vivo*. Тема и описания экспериментов одобрены этической комиссией ГБОУ ВПО СГМУ им. В.И. Разумовского Минздрава РФ (протокол № 1 от 05.09.2023 г.). Гистологический анализ проводился стандартным методом.

На основании морфологического исследования можно сделать вывод, что синтезированный комплекс обладает биосовместимостью и имеет перспективы использования при проведении фотодинамической терапии.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-22-00144, <https://rscf.ru/project/25-22-00144/>.

UNDERSTANDING THE INTERACTIONS OF ARTIFICIAL SPHINCTERS WITH URETHRA USING IN-SILICO MODELS

Shirsha Bose*

Department of Biosciences and Bioengineering, Indian Institute of Technology Jammu,
Jammu, India

* e-mail: shirsha.bose@iitjammu.ac.in

Urethra is a vascular tube connected to the urinary bladder which helps in the passage of urine. In certain cases, especially in aged people, the urethra might lose its capabilities to hold urine in the urinary bladder leading to involuntary leakage. Such a situation is known as stress urinary incontinence (SUI) – can occur in both male and female. Currently, a surgical treatment of implanting a artificial urethral sphincter (AUS) exist [1]. AUS consist of a silicon cuff which is inflated to create pressure to control the leakage of urine from bladder. Although this a gold standard of SUI treatment, yet the level of pressure applied on the urethra depends on the surgeon's experience. This can create issues as there is no actual prediction of the pressure that needs to be applied. Few studies focussed on understanding the level of pressure required [2], however, it is important to also understand the repetitive pressuring and depressurizing would lead to any issues in the tissues.

A multi-layered 3D urethra model is developed in Abaqus Similua CAE 2021 using images from Cunnae et al. [3]. Urethra typically is composed of two major layers – inner mucosa layer encompassed by a spongy layer of corpus spongiosum (CS). The inner mucosa layer is defined using third order Ogden model while the CS is modelled using second order Ogden model. A thin outer fascial layer is defined using the neo-Hookean model. All the material properties of various layers of urethra was obtained from these studies [3; 4]. Urinary cuff designed in Solidworks software and the levels of pressure will be estimated. The effect of pressuring and depressuring of the device on neighbouring tissues will be useful in understanding the level of damage (scarring of tissue) in the tissue. This study will shed light in understanding the pressure that would prevent the tissue damage.

References

1. Shelton T.M., Brimley S., Tsambarlis P., and Hellstrom W.J., 2020. Current perspectives on complications of surgical treatments for male stress urinary incontinence. *Sexual Medicine Reviews*, 8 (3), pp.443–449.

2. Wang F., Cao Z., Zhai L., Zhang J., Kong H., Lin W., and Fan Y., 2023. Biomechanical study of the male lower urinary tract: Simulation of internal and external sphincters dyssynergia. *Journal of Biomechanics*, 149, p.111475.
3. Cunnane E.M., Davis N.F., Cunnane C.V., Lorentz K.L., Ryan A.J., Hess J., Weinbaum J.S., Walsh M.T., O'Brien F.J. and Vorp D.A., 2021. Mechanical, compositional and morphological characterisation of the human male urethra for the development of a biomimetic tissue engineered urethral scaffold. *Biomaterials*, 269, p.120651.
4. Khorshidi M.A., Bose S., Watschke B., Mareena E. and Lally C., 2024. Characterisation of human penile tissue properties using experimental testing combined with multi-target inverse finite element modelling. *Acta Biomaterialia*, 184, pp.226–238.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF MICROARCHITECTURAL FEATURES ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF 3D-PRINTED EXOPROSTHETIC SOCKETS WITH LOCAL REINFORCEMENT

Daria Dolgikh*, Mikhail Tashkinov

Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Ave. Perm, 614990, Russia
* e-mail: dolgikhdar@pstu.ru

Modern prosthetic technologies aim not only to restore the lost function of limbs but also to ensure a high level of user comfort. Currently, prostheses are subject to increased demands, including the most accurate reproduction of natural movements, as well as enhanced strength and reliability of the structure during operation. A critical component of the prosthesis in transtibial amputation is the socket – a cup-shaped part that fits onto the amputated limb and transfers mechanical loads from the body to the prosthesis. Uneven load distribution from the residual limb along the inner surface of the socket leads to the formation of localized areas with elevated stresses, which can ultimately cause material failure in these zones. This study proposes a method of local reinforcement of the socket using carbon fiber to strengthen highly loaded areas with minimal increase in mass. Numerical modeling methods are applied for preliminary assessment of the socket's strength characteristics. The progressive failure method

was used to analyze damage accumulation processes under uneven load distribution. This approach provides a more accurate understanding of the failure mechanism and contributes to the development of more reliable and durable prosthetic solutions.

The aim of this study is to develop and validate a method for local reinforcement of conical sockets of transtibial prostheses using carbon rods to reduce stresses in areas of excessive load, increase structural stiffness, and enhance the durability of prosthetic devices. The work intends to determine the optimal placement parameters of the reinforcing elements for effective load redistribution and minimization of failure risk, thereby providing a foundation for further optimization of prosthetic socket design with improved performance characteristics.

The results were obtained within the research project no. FSNM-2024-0013.

MODELING FUNCTIONALLY-GRADED LATTICE SCAFFOLD STRUCTURE WITH MECHANICAL BEHAVIOR AND MORPHOMETRIC PARAMETERS

**Nataliya Elenskaya^{1*}, Ilia Vindokurov¹,
Ekaterina Smotrova-Kayali², Mikhail Tashkinov¹**

¹ Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Ave. Perm, 614990, Russia

² Wolfson School of Mechanical, Electrical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, Loughborough, UK

* e-mail: n.elenskaya@pstu.ru

Bone defects may arise due to large tumors, chronic fractures due to trauma, biochemical imbalances, infections, or genetic disorders affecting skeletal development. Addressing tissue loss-especially that caused by tumor growth and subsequent surgical removal-remains a major challenge in clinical practice. Additionally, for oncology patients, bone damage frequently results from metastatic disease, which is often detected at advanced stages and is associated with extensive local tumor invasion. This scenario often requires the removal of substantial bone segments, leading to significant disability, limited mobility, and a diminished quality of life for affected individuals. Treating such defects effectively is a persistent clinical challenge, particularly when bone healing is compromised or delayed. These challenges underscore the urgent need for advanced bone scaffolds that can facilitate regeneration and restore bone function.

In this study, we introduce a novel method for selecting scaffold geometry and mechanical properties, guided by a microtomographic model of reference bone tissue and the morphometric parameters of the target structure. The scaffold designs are based on triply periodic minimal surfaces (TPMS), which are tailored by adjusting surface parameters, as well as the number and orientation of elementary cells. To evaluate mechanical performance, stress distributions within the scaffold and the reference model were compared under identical loading conditions. The study also examined how different types of TPMS-based elementary cells and functional gradients influence the morphometric characteristics and mechanical behavior of the scaffold structure. Findings indicate that the spatial orientation of elementary cells plays a crucial role in determining the scaffold's mechanical response and stress distribution under various loading scenarios. This approach offers valuable insights for researchers and clinicians engaged in bone tissue engineering, providing practical solutions for bone regeneration and repair.

The results were obtained within the framework of research project no. FSNM-2025-0001.

FLUID STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS OF PARAMETRIC STENT GEOMETRY INFLUENCE ON WALL SHEAR STRESS-INDUCED LOW DENSITY LIPOPROTEIN ACCUMULATION

Aleksandr Khairulin, Alex G. Kuchumov*

Biofluids Laboratory, Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Ave. Perm, 614990, Russia

* e-mail: s.xayrulin@mail.ru

Stent geometry plays a crucial role on low density lipoprotein (LDL) accumulation induced by wall shear stress (WSS) evolution. Finding a relation between parametrization of stents and WSS-induced LDL accumulation is a complex task. We propose an approach to find a relation between design and its influence on LDL transport including structural design of stents, numerical simulation of stent behaviour in multi-layered diseased artery and algorithm of WSS-induced LDL accumulation.

Two-way FSI problem of blood flow in three-layered atherosclerosis-prone artery was considered. Intima thickness growth is estimated using a system of

coupled first-order ordinary differential equations that describe the process of LDL accumulation and thickness change over time.

It was revealed that an increase in LDL mass was observed with increasing stent diameter. For 3-mm diameter stents, the minimum values of LDL mass ranged from $8.006 \cdot 10^{-7}$ kg to $8.416 \cdot 10^{-7}$ kg. For 4 mm diameter stents, the minimum values of LDL mass ranged from $8.496 \cdot 10^{-7}$ kg to $9.055 \cdot 10^{-7}$ kg. Mean values of LDL mass ranged from $1.492 \cdot 10^{-6}$ kg to $1.511 \cdot 10^{-6}$ kg.

Sinusoidal stents show lower minimum and maximum low-density lipoprotein (LDL) mass values, which may indicate that they are more effective in preventing accumulation. On the other hand, spiral stents have lower average LDL mass values, which may indicate their better average efficacy. Our complex approach gives a possibility to obtain the optimal structure and properties for patient-specific stent production in the future.

Alex G. Kuchumov and Aleksandr Khairulin thank the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for financial assistance within the framework of the state assignment for performing fundamental scientific research (FSNM-2025-0001).

APPLICATION OF BIOMEDICAL ENGINEERING METHODS TO CHALLENGE CARDIOVASCULAR SURGERY PROBLEMS

Alex G. Kuchumov*, Nikita Pil, Aleksandr Khairulin, Denis Khoroshev

Biofluids Laboratory, Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Ave. Perm, 614990, Russia

* e-mail: kychumov@inbox.ru

Biomedical engineering is an interdisciplinary field that combines knowledge of medicine and engineering to develop innovative solutions in healthcare, especially in cardiovascular surgery. The relevance of incorporating new technologies into surgical practices is necessary to improve cardiovascular outcomes. The presented work on hemodynamic analysis in the aortic valve and modeling of arterial stenting will be discussed.

– Modeling of blood flow in a stented artery and additive manufacturing of stents

3D-modeling of 5 coronary stent geometries and numerical simulation of the stent expansion process were performed. A biodegradable material

(PLLA) was used as the stent material. FDM printing of stent geometries was realized and mechanical properties of the obtained constructs were tested. To effectively analyze the behavior of the printed constructs, mathematical modeling of stent opening in the vessel was performed. Based on the modeling results, the coefficients of radial elasticity, shortening and non-uniformity of stent opening were calculated. A comparative analysis of the influence of the stent wall thickness on its ability to expand and maintain its stress-strain state was also performed.

- *Aortic valve leaflets motion trajectories tracking by using echocardiography data*

In this study, a software module was developed to track the movement of control points marked on the aortic valve leaflet, using computer vision algorithms applied to echocardiography video data. The program utilizes a neural network based on the YOLOv8 library for semantic segmentation and object detection, enabling precise identification and real-time tracking of the valve leaflets. The software was initially validated on model data to ensure the accuracy and reliability of the tracking algorithm. It was then applied to real echocardiography data, successfully reconstructing the trajectories of the aortic valve leaflets throughout the cardiac cycle. These trajectories can be used in conjunction with mathematical models to determine the mechanical properties of the valve leaflets using optimization methods.

Alex G. Kuchumov thanks the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for financial assistance within the framework of the state assignment for performing fundamental scientific research (FSNM-2024-0009).

THE INFLUENCE OF BLOOD MODELS ON THE HEMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE FLOW IN THE CIRCLE OF WILLIS

Alexandra Lyubimova*, Alex G. Kuchumov

Biofluids Laboratory, Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Ave. Perm, 614990, Russia

* e-mail: sashal05@mail.ru

A vascular aneurysm is a pathological stretching or thinning of the artery wall, which causes the artery wall to bulge. Given the impact of blood flow in one or more places of the artery, its walls can become thinner, forming a bulge.

This condition threatens the patient with a sudden rupture with the development of intracranial hemorrhage, the so-called hemorrhagic stroke. Cerebral vascular aneurysms (circle of Willis) are considered particularly dangerous because of their location, limited by the cranial region and the proximity of the brain. Numerical investigation using computational fluid dynamics (CFD) methods can help in predicting the risk assessment of aneurysm rupture. In this study, five models of Willis circle vessels with aneurysms were considered. Blood was considered as a Newtonian fluid and as a non-Newtonian fluid with a time-dependent viscosity (the Carreau model). The problem of unsteady flow has been solved. A time-dependent flow rate was set at the boundaries of the arteries through which blood enters the vessels; a constant pressure was set at the boundaries through which blood leaves the vessels. The velocity, pressure, and wall shear stress distribution fields of the wall were analyzed. The results of the model comparison showed that the values of velocities, pressure, and wall shear stresses on average remain close for all five models, but the nature of blood flow differs when considering different blood models. The greatest differences are observed in models with an aneurysm located on the anterior connective artery (case 1), as well as in the area of branching of the right posterior connective artery and the right internal carotid artery (case 2). The maximum velocity values differ by 6.02 % in case 1 and 7.23 % in case 2, the pressure values differ by 1.78 % and 10.89 %, respectively, and the values of the wall tangential stresses differ by 4.62 % and 52.86 %, respectively. When comparing the results of numerical calculation of blood flow velocities with experimental data, a greater similarity of values for the non-Newtonian blood model was found. It is also noted that when considering blood as a Newtonian fluid, the numerical calculation time is shorter.

Alex G. Kuchumov and Alexandra Lyubimova thank the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for financial assistance within the framework of the state assignment for performing fundamental scientific research (FSNM-2025-0001).

MULTISCALE MODELLING OF MYOCARDIAL INFARCTION AND REMODELLING: WHERE ARE WE AND WHAT IS NEXT?

Fulufhelo Nemavhola*

Durban University of Technology, Faculty of Engineering and the Built Environment,
Durban, Department of Mechanical Engineering KwaZulu-Natal Province, South Africa

* e-mail: FulufheloN1@dut.ac.za

Myocardial infarction (MI) triggers a complex molecular, cellular and tissue-level response that restructures the organ through inflammation, scar formation and adverse remodelling. Integrating data at different levels of the biological hierarchy, from ion-channel kinetics and electrophysiology to extracellular matrix dynamics and 3d ventricular mechanics, has recently become possible with the development of multiscale computational models, which help elucidate mechanisms of post-infarct healing and dysfunction (Aboelkassem et al. 2019; Trayanova et al. 2023).

This review outlines, in the first section, early attempts based on 1D fibre models and lumped-parameter models of infarct compliance (Peng et al. 2019), and describes modern frameworks that couple cellular calcium handling, mechano-electrical coupling, and finite-element ventricular deformation models (Beetz et al. 2023). We then analyse tissue-scale scar formation models comprising agent-based inflammatory cell infiltration and continuum collagen deposition models, which drive organ-scale simulations describing chamber geometry, wall-stress distribution, and arrhythmia susceptibility (Gebauer et al. 2023).

The remaining challenges include uncertainty of parameters in patient-specific remodelling rates, the rigorous coupling between biochemical signalling networks and biomechanical growth laws, and the computational expense of fully coupled four-dimensional simulations (Bracamonte & Holmes, 2025). Addressing these gaps may include machine-learning-driven surrogate models for rapid parameter estimation, reduced-order methods for fluid-structure interaction acceleration, and open-source frameworks for model interoperability, validation, and standardisation.

Integrating novel data types such as single-cell transcriptomics, high-resolution imaging of the extracellular matrix, and continuous monitoring will further enhance the predictive models of infarct evolution (Trayanova et al., 2023; Peng et al., 2019). Clinically actionable MI patient “digital twins” will require innovative algorithms, comprehensive data harmonization, uncertainty quantification, and regulatory validation. This review seeks to provide a focused analysis of the current landscape of multiscale MI modelling to help chart strategic milestones aimed towards translating calibrated impact in personalised cardiac care.

References

- Aboelkassem, Y., Powers, J.D., McCabe, K.J. & McCulloch, A.D., 2019. Multiscale models of cardiac muscle biophysics and tissue remodelling in hypertrophic cardiomyopathies. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 11, pp. 35–44.
- Beetz, M., Banerjee, A., Camps, J., Li, L. & Grau, V., 2023. Influence of myocardial infarction on QRS properties: a simulation study. *arXiv preprint arXiv: 2304.01796*.
- Bracamonte, J.H. & Holmes, J.W., 2025. Integration and bridging of multiscale bioengineering designs and tissue biomechanics. In: *Virtual Heart Therapy: Multiscale Models of Cardiac Disease Treatment and Recovery*. Cham: Springer, pp.341–402.
- Gebauer, A.M., Pfaller, M.R., Bräu, F.A., Cyron, C.J. & Wall, W.A., 2023. A homogenised constrained mixture model of cardiac growth and remodelling: analysing mechanobiological stability and reversal. *Biomechanics and Modelling in Mechanobiology*, 22 (6), pp. 1983–2002.
- Peng, G.C.Y. et al., 2019. Multiscale modelling meets machine learning: what can we learn? *arXiv preprint arXiv: 1911.11956*.
- Trayanova, N.A. et al., 2023. Computational modelling of cardiac electrophysiology and arrhythmias: from single cell to organ. *Physiological Reviews*, 103 (2), pp. 455–551.

ESTIMATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CELLULAR STRUCTURES BASED ON MODIFIED GIBSON – ASHBY CELL

Andrei Nikitin, Siarhei Bosiakov*

Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Avenue, Minsk, 220030, Belarus

* e-mail: bosiakov@bsu.by

The Gibson-Ashby relations for three-dimensional cellular materials are widely used analytical model for description of the equivalent mechanical properties of porous structures. However, the vertical elementary beams of unit Gibson – Ashby cell are assumed as undeformed columns. The aim of this study is assessment of equivalent Young's modulus for cellular structures with

different porosity with using of Gibson – Ashby model of unit cell considering compressive deformations of the vertical elementary beams.

The relationship for the equivalent Young's modulus was derived considering the deflections of horizontal elementary beams, as well as the compression of vertical elementary beams of the cell and vertical beams attaching the cells. It was assumed that the cellular structure is subjected to a uniformly distributed normal compressive load directed along the longitudinal axis of the vertical elementary beams. Boundary conditions for horizontal elementary beams with hinged ends and fixed ends were considered. The porosity of the material is determined by the ratio between the geometric parameters of the elementary beams.

The obtained dependence of the equivalent Young's modulus on porosity for metamaterials with a porosity of more than 60 % corresponds to the results obtained using the known Gibson – Ashby model, considering the deformations of horizontal elementary beams only. However, if porosity of less than 60 %, the dependence of the equivalent Young's modulus differs significantly from the known model and corresponds with high accuracy to porous materials with uniformly distributed pores with a diameter of 200 to 500 μm . Young's modulus for cellular structures approaches to a certain asymptotic value with an increase in the number of cells in different spatial directions. The asymptotic value of Young's modulus for structures based on the Gibson – Ashby cell with fixed ends is more than asymptotic value of the same cellular structure, but with hinged ends of the elementary beams.

The obtained results can be used to estimate the equivalent Young's moduli for cellular structures of implant materials filled with different types of bone tissue.

The study was supported by the State Scientific Research Program “Convergence” (Instruction No. 1.7.1.4 “Development of differential and fractional-differential methods and their application to modeling complex biomechanical and economic systems”).

HYPERELASTIC PARAMETER ESTIMATION FOR RAT MYOCARDIUM: INSIGHTS INTO REGIONAL CARDIAC TISSUE MECHANICS

Thanyani Pandelani ^{1*}, Harry Ngwangwa ¹, Fulufhelo Nemavhola ²

¹ Unisa Biomedical Engineering Research Group, Department of Mechanical, Bioresources and Biomedical Engineering, School of Engineering and the Built Environment, College of Science Engineering and Technology, University of South Africa, Science Campus, Florida, 1710, South Africa

² Faculty of Engineering and the Built Environment, Durban University of Technology, Durban, South Africa

* e-mail: epandet@unisa.ac.za

Accurate modeling of cardiac mechanics is essential for understanding heart disease progression and informing computational simulations of therapeutic interventions. This study investigates the regional mechanical behavior of rat myocardium by estimating hyperelastic parameters from biaxial tensile tests conducted using the BioTester 5000 CellScale on the left ventricle (LV), septal wall (STW), and right ventricle (RV). Six widely used constitutive models—Fung, Choi-Vito, Holzapfel (2000 and 2005), Four-Fiber Family, and Polynomial (Anisotropic) – were fitted to experimental stress-strain data using optimization algorithms implemented in HYPERFIT software.

The Polynomial (Anisotropic) model demonstrated superior performance across all regions, yielding coefficients of determination (R^2) consistently above 90 %. The Holzapfel and Four-Fiber Family models provided reasonable fits for LV and STW regions but were less accurate for RV tissues, highlighting the latter's distinct mechanical properties and higher anisotropy. Fung and Choi-Vito models underperformed across all regions due to their lack of fiber orientation and anisotropic terms.

These findings underscore the necessity of region-specific material models in cardiac simulations and reveal critical insights into the heterogeneous mechanics of the heart. The derived parameters offer a robust foundation for future finite element modeling of rat hearts and contribute toward improving computational frameworks for cardiovascular disease research.

MANUFACTURING OF TUBULAR OBJECTS WITH VARIATION OF SHAPE AND CROSS-SECTION PARAMETERS USING NON-PLANAR MULTI-AXIAL 3D-PRINTING

Nikita Piatkovsky*, Mikhail Tashkinov

Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Ave. Perm, 614990, Russia

* e-mail: n.piatkovsky@pstu.ru

Currently, FDM printing is a dynamically developing branch of additive manufacturing, enabling the production of geometrically complex objects with specialized properties. However, FDM printing has significant limitations. Overhangs exceeding angles of 45° – 60° are difficult to print without auxiliary supports. This issue can be addressed by multi-axis printers, which utilize more than three axes to provide additional degrees of freedom.

At present, there are relatively few algorithms for parametric G-code generation exist for multi-axis FDM printing. This work employs a parametric approach to geometry creation, allowing rapid modification of shape, dimensions, and printing parameters for the selected uniform geometries. Hollow tubes constructed along a guiding curve, an arc of a circle, were chosen as the geometric model. The program's input parameters include the radius of the circular arc, the inclination angle of the arc, and the dimensions and shape of the cross-section.

The objective of this study was to develop a set of algorithms based on non-planar slicing, which enable the printing of hollow curved tubular objects with controllable parameters of the skeletal curve and cross-section on a multi-axis robotic FDM printer. The output of the algorithm is the G-code for a robotic multi-axis FDM printer. Further improvements to the algorithm have enabled the printing of tubes extended along various curves or polylines. Additionally, the capability to modify the cross-section shape and its parameters has been incorporated.

The results of this research may be of interest for expanding the range of parametrically defined printable forms, as well as for applications in bio-printing.

The results were obtained within the research project no. FSNM-2024-0013.

COUPLED ELECTROPHYSIOLOGICAL LEFT VENTRICLE–AORTIC VALVE FSI MODEL OF BLOOD FLOW

Nikita Pil*, Alex G. Kuchumov

Biofluids Laboratory, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky Ave.
Perm, 614990, Russia

* e-mail: nikitapil32@gmail.com

Fluid-structure interaction (FSI) modeling offers a quantitative framework for assessing valve hemodynamics, but the accuracy of such modeling is highly dependent on the prescribed inflow boundary conditions. In this study, we present a fully coupled electrophysiologic-electromechanical FSI model that combines: A parameterized, fiber-informed left ventricular (LV) geometry with linear transmural variation of fiber angles (from -60° in the epicardium to $+60^\circ$ in the endocardium) and an ascending aortic segment equipped with tricuspid aortic valve leaflets, described by a hyperelastic anisotropic Holzapfel-Hasser-Ogden model.

Myocardial activation was modeled using a modified Aliev-Panfilov formula providing transmembrane potential from -80 mV to $+20$ mV. Five LV morphologies were generated to evaluate the geometric effects on hemodynamic parameters. Electromechanical coupling resulted in peak systolic strains of 38–60 % and apex displacements of 15–20 mm with maximum torsional angles of 15° – 20° . The resulting time-dependent velocity vector fields in the LV outlet tract (LVOT) were imposed as boundary conditions of the aortic valve FSI domain entry.

Simulated aortic jets reached $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ during full leaflet opening and exhibited marked spatial heterogeneity and vortex structures throughout systole and early diastole. The distribution of von Mises stress in the leaflets and time-averaged wall shear stress was significantly dependent on LV geometry.

These results suggest that patient-specific LV morphology has a dominant influence on aortic valve stress and flow patterns. Therefore, the inclusion of physiologically realistic, inflow velocity fields is necessary to qualitatively predict valve performance and identify areas at increased risk of calcification and leaflet fatigue.

Alex G. Kuchumov and Nikita Pil thank the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for financial assistance within the framework of the state assignment for performing fundamental scientific research (FSNM-2024-0009).

NUMERICAL SIMULATION OF TISSUE CONSTRUCTION PROCESS BASED ON ACOUSTIC LEVITATION TECHNIQUES

Evgeniy Pyriaev *, Katerina Beklemisheva

Moscow Institute of Physics and Technology, Institutsky lane, d. 9, Dolgoprudny, 141701, Russia

* e-mail: pyriaev.ev@phystech.edu

Acoustic levitation is a technology that uses sound waves to hold objects in a fluid without physical contact. It is finding increasing application in various fields of science and technology, including biomedical technology and bioengineering. Acoustic levitation allows cells to be maintained in suspension without the use of traditional methods such as centrifugation or nutrient media. This is especially useful for studying cellular interactions, as well as maintaining cellular viability due to the absence of mechanical contact. Despite the growing number of experimental studies of acoustic levitation in biofabrication, the technology remains poorly understood in terms of numerical experiments. Acoustic levitation is most often modeled using the finite element method, the use of which in acoustics problems is associated with certain drawbacks. This study is devoted to the numerical modeling of various formulations of acoustic levitation problems. The software package used for calculations is based on the grid-characteristic method, which allows solving a viscoelastic system of equations in three-dimensional coordinates in the time domain. The advantage of the method is the high spatial and temporal resolution of the processes of propagation, reflection and reception of the signal.

Numerical calculation allows obtaining the distribution of pressure and fluid velocity at each point at each moment in time, which allows calculating the acoustic potential in the calculation domain and analyzing it for the presence of wells-minima of energy. The results of such a calculation for the simplest acoustic setup – a system of a radiator and a reflector located one above the other, as well as an optimization algorithm for the iterative search for the optimal configuration of the system from the energy point of view are presented. In addition, the problem of constructing a potential, the shape of the minimum of which repeats the walls of a branching blood vessel, is considered, and the effect of including a polymer matrix holding cell spheroids in the calculation domain on the axis of the vessel on the power of the resulting acoustic radiation is studied.

MODELLING TRABECULAR BONE ADAPTATION USING EMBEDDED CONFIGURATION

Ekaterina Smotrova-Kayali *, Simin Li, Vadim V. Silberschmidt

Wolfson School of Mechanical, Electrical and Manufacturing Engineering,
Loughborough University, Loughborough, UK

* e-mail: e.smotrova@lboro.ac.uk

Trabecular bone (TB) undergoes adaptation when subjected to external loads. This process is modelled using numerical simulations aiming for quantification of mechanical and morphological changes in TB due to loading. To be used in simulations, bone adaptation is approximated in the form of mathematical models describing formation and resorption activities as a function of mechanical stimuli. Mechanical stimuli (e.g. strain energy density) are calculated in a finite-element model, representing TB tissue, subjected to boundary conditions (BCs). Most of the studies modelling TB adaptation developed finite-element models as domains extracted from scans of TB with BCs applied via rigid plates. This approach resulted in distribution of mechanical stimuli in the models different from those in *in situ* TB. In addition, the “side-effect” artifact appeared in these models, expressed as reduction in stress values in peripheral trabeculae due to loss of their connectivity [1]. To avoid these consequences, the “embedded” configuration, i.e., application of BCs to the analysis domain via layer of TB, was investigated previously for measurement of apparent stiffness of TB cuboids and improved the predicted results as compared to scenarios when BCs were applied directly to the analysis domain [2].

In this study, the effect of embedded configuration on modelling of TB adaptation was investigated. For this purpose, cuboids of TB were extracted from high-resolution peripheral quantitative CT scans of human distal tibia and used to develop baseline finite-element models. Several sets of parameters’ values of the bone adaptation model were used to regulate adaptation process in the baseline models. The obtained simulated results were element-by-element compared with the corresponding follow-up models developed from the scans after six months of physiological loading. The embedded cuboids demonstrated higher correspondence with the follow-up models than the ones with BCs applied directly to their surfaces.

References

1. K. Daszkiewicz et al., “The effective elastic properties of human trabecular bone may be approximated using micro-finite element analyses of embedded volume elements,” *Biomech Model Mechanobiol*, 16 (3), pp. 731–742, 2017.
2. N.M. Harrison et al., “Comparison of trabecular bone behavior in core and whole bone samples using high-resolution modeling of a vertebral body,” *Biomech Model Mechanobiol*, 9 (4), pp. 469–480, 2010.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THERMO-MECHANICAL BEHAVIOR OF AUXETIC CYLINDRICAL STRUCTURES

Anastasia Tarasova*, Mikhail Tashkinov

Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky Ave., Perm, 614990, Russia

* e-mail: a.tarasova@pstu.ru

Mechanical metamaterials with a negative Poisson’s ratio (NPR), known as auxetics, possess the unique property of expanding laterally when stretched longitudinally. This behavior occurs from the geometry of re-entrant cells, where the angles between the ribs increase during stretching, causing coordinated movement and overall expansion of the structure. Auxetics are highly valued for their exceptional characteristics: high impact resistance, efficient energy absorption, and controllable deformation, making them promising for aerospace, automotive, sports, and biomedical applications. Tubular and axisymmetric auxetic cylinders are of particular interest due to their optimal strength-to-weight ratio. Most research focuses on structures where auxetic behavior manifests along the cylinder axis, while designs with auxetic planes oriented perpendicular to the cylinder axis have been studied significantly less.

This work presents a novel design of auxetic cylinders formed by rings of re-entrant cells arranged in a plane perpendicular to the cylinder axis and repeatedly stacked along the axis. The structure features a radial geometric gradient, enabling flexible control of mechanical properties. The aim of the study is to

evaluate the mechanical response of such cylinders under combined mechanical loading and temperature effects, analyze deformations considering the coefficient of thermal expansion (CTE) of the material, and investigate the influence of geometry on structural behavior. A comparison with cylinders made from other lattice types is also conducted.

Numerical results show that scaling size and cell density significantly affect deformations. Increased CTE leads to more pronounced deformations, highlighting the importance of thermal effects. Structures with lower cell density can exhibit deformations comparable to or exceeding those of denser variants. The introduction of internal pressure reduces radial expansion caused by heating. These findings demonstrate the proposed design's strong potential for creating materials with controlled thermal expansion and unique deformation features, useful across various engineering fields.

The results were obtained within the research project no. FSNM-2024-0013.

Научное издание

**МЕХАНИКА БИОМЕДИЦИНСКИХ МАТЕРИАЛОВ И УСТРОЙСТВ
(МБМУ-2025)**

Материалы II Международной конференции
(Пермь, 15–17 июля 2025 г.)

**MECHANICS OF BIOMEDICAL MATERIALS
AND DEVICES**

2nd International Conference
(Perm, July 15–17)

Подписано в печать 28.10.2025. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 8,44. Тираж 22 экз. Заказ № 176.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.

Отпечатано в типографии Издательства
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.