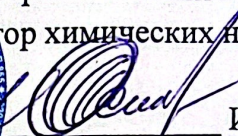


## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям  
ФГБОУ ВО «Саратовский  
государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А.»,  
доктор химических наук, профессор



  
И.Г. Остроумов

19 » 08 2024 года

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Большакова Павла Владиславовича «Моделирование процессов деформирования элементов конструкций на основе учета влияния их структуры на напряженно-деформируемое состояние», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – «Механика деформируемого твёрдого тела»

#### Актуальность.

В настоящее время аддитивные технологии широко применяются в различных сферах деятельности. Одним из преимуществ данной технологии – возможность производства изделий со сложной внутренней структурой. Так, различают два вида структур: решетчатая и пористая. В современной литературе введен термин элементарной ячейки для описания таких структур. Решетчатая элементарная ячейка может быть описана набором замкнутых ребер, их толщиной и другими геометрическими параметрами. Пористая элементарная ячейка описывается же количеством и геометрией пор. Одной из особенностей изделий, обладающих сложной внутренней структурой, является зависимость их физико-механических характеристик от типа элементарной ячейки. А значит, что эксплуатационные нагрузки и особенностей работы конструкции и определяют выбор элементарной ячейки. Частым подходом для решения этой задачи является исследование напряженно-деформированного состояния одной конкретной ячейки и масштабирование этого результата на все изделие из предположения равномерного распределения исследованной ячейки. Такой подход позволяет решить задачу и в том числе, уменьшить вес конструкции. Стоит отметить, что на данный момент нет точных и однозначных методов для определения типа начальной ячейки. Более того при таком подходе существует неравномерность нагружения итоговой конструкции, поэтому одним из решений данной проблемы является разработка методов коррекции пористых и решетчатых структур, которые будут позволять формировать изделие с градиентным заполнением элементарных ячеек. В этой связи, тема диссертационной работы представляется **актуальной** и практически востребованной. В диссертации рассмотрены элементы конструкций, обладающие решетчатой и пористой структурами, с целью реализации новых подходов к моделированию процессов деформирования с учетом влияния структуры на напряженно-деформируемое состояние

#### Научная новизна.

1. Определены функции влияния геометрических параметров элементарной решетчатой и пористой ячеек на напряженно-деформированное состояние.

2. Предложены и реализованы численные методики коррекции конструкций пористой и решетчатой структур.

3. Разработана численная методика коррекции конструкций с нерегулярной пористой структурой.

4. Проведены натурные и численные эксперименты сформированных решетчатых и пористых конструкций.

**Достоверность полученных результатов.** Результаты исследования обеспечиваются применением строгих математических методов, корректностью математической постановки задачи теории упругости, сравнением результатов с известными результатами других авторов, а также с результатами экспериментов.

**Практическая значимость.** Разработанные методы коррекции могут использоваться в различных отраслях. В частности, для проектирования новых персонализированных имплантов, а также могут быть применены в рамках научно-поисковых работ в лабораториях и институтах.

Апробация результатов работы была проведена на российских и международных конференциях:

– XXV, XXVI, XXVII, XVIII международный научный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова (Кременки 2019-2022г.)

– Международная научная конференция «European Society of Biomechanics Congress» (Вена, 2019г).

– VIII Международная научная конференция «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского» (Москва, 2019г).

– Международный научный семинар «Joint Seminar of Kazan Federal University and Kanazawa University on Biomechanics, Optimization and its Related Research» (Казань, 2020г).

– Международная научная конференция «Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам» (Алушта, 2021г).

– Международный научный симпозиум «Japan-Russia Online Joint Symposium», (Казань, 2021г).

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа общим объемом 131 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 123 источника. Текст иллюстрируется 70 рисунками и 14 таблицами.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 23 работах, из них 3 в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, 6 в журналах и изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus (3 статьи в журналах Q1) и Russian Science Citation Index, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Во введении** обосновывается актуальность и научная новизна темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту и личный вклад автора.

**Первая глава** представляет собой литературный обзор современного состояния аддитивного производства. Подчеркивает влияние аддитивного производства на персонализированную медицину. Описывает проблему выбора типа элементарной ячейки и ее распределения по всему изделию.

**Вторая глава** посвящена исследованию решетчатой структуры, элементарной ячейкой которой выступают ребра гексагональной бипирамиды. В результате исследования были определены функции влияния геометрии элементарной ячейки на напряженно-деформированное состояние ячейки. На основе найденных функций была рассмотрена задача коррекции геометрии эндопротеза длинных костей, для чего был предложен и реализован численный метод. В результате численных исследований была определена диаграмма Парето и предложена оптимальная структура эндопротеза.

**Третья глава** посвящена исследованию задач численного метода коррекции пористых изделий. На основе найденных функций влияния эффективных механических свойств элементарной ячейки в зависимости от параметров, описывающих геометрию поры, был сформулирован и реализован метод коррекции пористых изделий. Приводятся результаты численных и натуральных экспериментов изделий, полученных на основе предложенного метода. Показано влияние направлений печати на механические свойства изделий.

**Четвертая глава** посвящена разработке метода коррекции изделий для формирования нерегулярной пористой структуры. На основе обобщения метода диаграмм Вороного на локально ортотропное пространство был предложен и реализован новый численный метод. Для проверки метода была решена тестовая задача, после которой были проведены численные расчеты сформированной методом конструкций.

В качестве основных результатов диссертационной работы можно выделить следующее:

1. Предложен и реализован численный метод коррекции конструкций с решетчатой структурой. В качестве корректируемой конструкции был выбран эндопротез длинных костей. У скорректированного эндопротеза количество ребер уменьшилось на 28.7%, напряжение при этом уменьшалось на 4.8%. Эндопротез был изготовлен с помощью технологии селективного лазерного плавления. Выявлено наиболее удачное расположение производства эндопротеза. Изделие прошло клинические испытания на животных. Морфологические исследования свидетельствовали о сохранении диффузии веществ и миграции клеток через решетчатый эндопротез.

2. Предложен и реализован численный метод коррекции конструкций с регулярной пористой структурой. В качестве исследуемой конструкции была принята балка с защемленными концами и действующей по центру нагрузкой. Для элементарной ячейки (куб с эллипсоидной порой) определена функция влияния геометрических параметров поры на механические свойства. Проведены численные и натурные эксперименты сформированных структур. Образцы печатались в двух направлениях: продольное и поперечное. В случае печати с продольным направлением предельное усилие скорректированного образца на 8.2 % выше образца без пор. У образца, напечатанного в поперечном направлении, жесткость была на 55 % выше, чем у образца без пор. Данные результаты иллюстрируют значительное влияние направления печати на механические свойства.

3. Предложен и реализован численный метод коррекции конструкций с нерегулярной пористой структурой. В качестве исследуемой конструкции была принята балка с защемленными концами и действующей по центру нагрузкой. Для формирования неоднородной структуры был создан модифицированный метод построения диаграмм Вороного. Для отработки метода была решена тестовая задача. Произведена коррекция для конструкций, у которых количество кластеров составляет 50, 75 и 100. Проведены численные эксперименты конструкции с нерегулярной пористой структурой. Напряжения у образцов с нерегулярной структурой уменьшились на 20% в зоне действия кинематической нагрузки, но

увеличились на 20% в зоне граничных условий в сравнении с образцом регулярной пористой структурой. Изделия с нерегулярной пористой структурой обладают схожей жесткостью с первоначальным образцом, но при этом их пористость составляет от 21.5 до 22.8 %.

**Анализ диссертационной работы позволяет сделать следующие замечания:**

1. Автор уделяет много внимание визуализации научных результатов, однако при исследовании напряженно-деформированного состояния конструкций было бы хорошо привести графики нагрузка-перемещения или интенсивность деформаций – интенсивность напряжений.

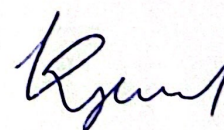
2. При исследовании вживления протеза в животном, что, несомненно, является украшением диссертации, результаты, приведенные на рис. 2.26 «Микрофотография кости: 110 дней после трансплантации, контрольное животное (а); 110 дней после трансплантации, опытное животное (б)», не очень информативны, т.к. тяжело понять, где протез, а где ткань.

Указанные замечания не оказывают принципиального влияния на общую положительную оценку работы, на ее научную новизну и практическую значимость и носят рекомендательный характер. Результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах российских – «Российский журнал биомеханики», входящим в квартиль K2 Российского индекса научного цитирования, и зарубежном журнале «Materials», входящем в квартиль Q2, Scopus и WoS. Практическая значимость подчеркивается регистрацией двух программ для ЭВМ.

В целом научно-квалификационная работа Большакова П.В. «Моделирование процессов деформирования элементов конструкций на основе учета влияния их структуры на напряженно-деформируемое состояние», является завершенной, выполненная на очень высоком уровне и отвечает требованиям предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, установленным в Постановлении Правительства РФ от 24.09.2013 №842 «О порядке присуждения учёных степеней», и её автор, Большаков Павел Владиславович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв ведущей организации на диссертацию Большакова Павла Владиславовича, выполненной на тему «Моделирование процессов деформирования элементов конструкций на основе учета влияния их структуры на напряженно-деформируемое состояние» обсужден и утвержден на заседании кафедры «Математика и моделирование» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.». На заседании присутствовало 12 научно-педагогических работников. Результаты голосования за утверждение данного отзыва: «за» - 12, «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 21 от «28» июня 2024 года.

Крысько Вадим Анатольевич, д.т.н., профессор, Почетный доктор Технического университета г. Лодзь (Польша), Лауреат общенациональной премии «Профессор года» 2021 в номинации «Технические науки», Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, Заведующий кафедрой «Математика и моделирование», Федеральное государственное бюджетное



Крысько  
Вадим Анатольевич

образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Жигалов Максим Викторович, д.ф.-м.н., доцент, Почетный работник сферы образования РФ, профессор кафедры «Математика и моделирование», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»



Жигалов  
Максим Викторович

**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (ФГБОУ ВО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.»)

Адрес: 410008, г. Саратов, улица Политехническая, 77

телефон: 7 (8452) 99-86-03, e-mail: [sstu\\_office@sstu.ru](mailto:sstu_office@sstu.ru), сайт: <https://www.sstu.ru>

Подлинность подписи Крысько Вадима Анатольевича и Жигалова Максима Викторовича удостоверяю  
Ученый секретарь Ученого совета  
СГТУ имени Гагарина Ю.А.



А.В. Потапова

*С отзвон окомплек*

30.08.24

