

DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-2-114-121

УДК 616.314-089.843

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БИОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСТИ КАК СПОСОБА ВОССОЗДАНИЯ ПРИРОДНОЙ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА

Аванисян В. М.¹, Долгалев А. А.¹, Сергеев Ю. А.¹, Гаража С. Н.¹, Стоматов Д. В.², Акрамов М. Л.³, Гезуев Г. К.⁴, Омаров Р. М.⁵

¹ Ставропольский государственный медицинский университет, г. Ставрополь, Россия

² Пензенский институт усовершенствования врачей — филиал Российской медицинской

академии непрерывного профессионального образования, г. Пенза, Россия

³ ООО «СК-ХОЛДИНГ», г. Москва, Россия

⁴ ООО «ДЕНТА-СИТИ», г. Грозный, Россия

⁵ ООО «Стоматологическая клиника «Улыбка», г. Нягань, Россия

Аннотация

Актуальность. Кость является минеральноорганическим композитом со сложной структурой. Костное моделирование для различных экспериментов также предполагает разное оформление и приложение нагрузок. Применяемые аддитивные технологии в содружестве с необходимым оборудованием помогают воссоздать структурные особенности челюстных костей с целью изучения будущей имплантации или положения ортопедической конструкции. Не всегда цифровая стоматология способна смоделировать все биологические нюансы, в таких случаях на помощь приходят модели и шаблоны, заранее изготовленные путем 3D-печати из материала со схожими прочностными характеристиками. **Цель работы.** Изучение прочностных свойств натуральной костной ткани на примере нижней челюсти барана с дальнейшим моделированием кости из материала со схожими прочностными характеристиками. **Материалы и методы.** Объектами исследования были выбраны образцы нижней челюсти лабораторного животного, а также модели-имитаты, изготовленные из материала для 3D-печати методом фотополимерного наплавления в форме кубиков, имитирующие кортикальную и губчатую структуры костной ткани. Испытуемые образцы помещались в винтовой держатель универсальной испытательной машины GOTECH AI 7000S с определением напряжения и предела нагрузки моделей-имитатов нижней челюсти, имитирующей костную ткань, заранее напечатанных на 3D-принтере с определенными параметрами, такими как плотность укладки слоев, их количество, вид полимерного материала, из которых они были изготовлены, получение аналогичных моделей челюстей из выбранных материалов и сравнение их характеристик с биологическим объектом исследования. **Результаты.** Определение оптимального материала, полученного при помощи метода фотополимерной печати, позволило получить наиболее эффективную и схожую по характеристикам с костной тканью модель, пригодную для более детального изучения поведения костной ткани, что позволяет применять данный материал в качестве фантомного материала при определении нагрузочных протоколов. **Заключение.** Количественные результаты нагрузочных тестов позволяют спрогнозировать прочностные результаты настоящей кости, при этом не расходуя время и материальные ресурсы на выявление и предикцию рисков.

Ключевые слова: моделирование кости, губчатая кость, кортикальная кость, 3D-печать, костная прочность, аддитивные технологии

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Данная работа выполнена в рамках программы «Старт-2» Фонда содействия инновациям по Договору № 4981ГС2/70566, Проект № 70566, заявка № С2-300791, в рамках реализации проекта «Разработка, изготовление и испытание опытного образца внутрикостных имплантатов из сплавов высокой прочности с биосовместимыми покрытиями для челюстно-лицевой хирургии и хирургической стоматологии».

Вазген Михайлович АВАНИСЯН ORCID ID 0000-0002-0316-5957

врач-стоматолог, ординатор 2 года обучения, Ставропольский государственный медицинский университет, г. Ставрополь, Россия

avanvaz@yandex.ru

Александр Александрович ДОЛГАЛЕВ ORCID ID 0000-0002-6352-6750

д.м.н., профессор кафедры общей стоматологии и детской стоматологии, Ставропольский государственный медицинский университет, г. Ставрополь, Россия

dolgalev@dolgalev.pro

Юрий Андреевич СЕРГЕЕВ ORCID ID 0000-0002-6183-2586

к.м.н., врач-стоматолог-ортопед, ассистент кафедры фармакологии, Ставропольский государственный медицинский университет, г. Ставрополь, Россия

serg_yuriy@mail.ru

Сергей Николаевич ГАРАЖА ORCID ID 0000-0002-3929-9252

д.м.н., профессор, заведующий кафедрой пропедевтики стоматологических заболеваний, Ставропольский

государственный медицинский университет, г. Ставрополь, Россия

s.nik56@mail.ru

Дмитрий Владимирович СТОМАТОВ ORCID ID 0000-0002-3271-971X

к.м.н., доцент кафедры стоматологии общей практики, стоматологии терапевтической и стоматологии детской, Пензенский институт

усовершенствования врачей — филиал Российской медицинской академии непрерывного профессионального образования, г. Пенза, Россия

grekstom@mail.ru

Максим Леонидович АКРАМОВ ORCID ID 0009-0007-3021-7496

врач-стоматолог-ортопед, стоматолог-хирург, стоматолог-терапевт, ООО «СК-ХОЛДИНГ», г. Москва, Россия

aurymdent@yandex.ru

Гималай Казбекович ГЕЗУЕВ ORCID ID 0009-0009-8612-4234

врач-стоматолог-ортопед, стоматолог-хирург, ООО «ДЕНТА-СИТИ», г. Грозный, Россия

denta_city@mail.ru

Рустам Миллатуллахович ОМАРОВ ORCID ID 0000-0001-8843-4580

врач-стоматолог-ортопед, стоматолог-хирург, ООО «Стоматологическая клиника «Улыбка», г. Нягань, Россия

dr.rustam90@mail.ru

Адрес для переписки: Юрий Андреевич СЕРГЕЕВ

355017, г. Ставрополь, ул. Мира, д. 310, Россия (СГМУ)

+7 (906) 4401889

serg_yuriy@mail.ru

Образец цитирования:

Аванисян В. М., Долгалев А. А., Сергеев Ю. А., Гаража С. Н., Стоматов Д. В., Акрамов М. Л., Гезуев Г. К., Омаров Р. М.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БИОЛОГИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСТИ КАК СПОСОБА ВОССОЗДАНИЯ ПРИРОДНОЙ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА. Проблемы стоматологии. 2024; 2: 114-121.

© Аванисян В. М. и др., 2024

DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-2-114-121

Поступила 07.06.2024. Принята к печати 24.07.2024

DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-2-114-121

APPLICATION OF THE METHOD OF BIOLOGICALLY ORIENTED BONE MODELING AS A WAY TO RECREATE THE NATURAL STRUCTURE AND STRENGTH UNDER EXPERIMENTAL CONDITIONS

Avanisyanyan V.M.¹, Dolgalev A.A.¹, Sergeev Yu.A.¹, Garazha S.N.¹, Stomatov D.V.², Akramov M.L.³, Gezuyev G.K.⁴, Omarov R.M.⁵

¹ Stavropol State Medical University, Stavropol, Russia

² Penza Institute of Advanced Medical Education – branch of the Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Penza, Russia

³ SK-HOLDING LLC, Moscow, Russia

⁴ DENTA-CITY LLC, Grozny, Russia

⁵ LLC «Dental clinic Smile», Nyagan, Russia

Annotation

The relevance. Bone is an organic mineral composite with a complex structure. Bone modeling for different experiments also involves different design and application of loads. The applied additive technologies, in conjunction with the necessary equipment, help to recreate the structural features of the jaw bones in order to study the future implantation or position of the orthopedic structure. Digital dentistry is not always able to simulate all the biological nuances, in such cases models and templates made in advance by 3D printing from a material with similar strength characteristics come to the rescue.

The aim of the study is to evaluate the strength properties of natural bone tissue using the example of the lower jaw of a ram with further modeling of bone from a material with similar strength characteristics.

Materials and methods. The objects of the study were selected samples of the mandible of a laboratory animal, as well as imitation models made of 3D printing material by photopolymer deposition in the form of cubes, simulating the cortical and spongy structures of bone tissue. The test samples were placed in the screw holder of the universal GOTECH Al 7000S testing machine with the determination of the stress and load limit of the mandibular imitation models simulating bone tissue, pre-printed on a 3D printer with certain parameters such as the density of the layers, their number, the type of polymer material from which they were made, obtaining similar models jaws made of selected materials and comparison of their characteristics with the biological object of study.

Results. The determination of the optimal material obtained using the photopolymer printing method made it possible to obtain the most effective and similar in characteristics to bone tissue model suitable for a more detailed study of the behavior of bone tissue, which allows using this material as a phantom material in determining load protocols.

Conclusion. Quantitative results of stress tests make it possible to predict the strength results of a real bone, while not spending time and material resources on identifying and predicting risks.

Keywords: bone modeling, spongy bone, cortical bone, 3D printing, bone strength, additive technologies

The authors declare no conflict of interest.

Vazgen M. AVANISYAN ORCID ID 0000-0002-0316-5957

Dentist, 2nd year Resident, Stavropol State Medical University, Stavropol, Russia
avanvaz@yandex.ru

Alexander A. DOLGALEV ORCID ID 0000-0002-6352-6750

Grand PhD in Medical sciences, Professor of the Department of General Dentistry and Pediatric Dentistry, Stavropol State Medical University, Stavropol, Russia
dolgalev@dolgalev.pro

Yuri A. SERGEEV ORCID ID 0000-0002-6183-2586

PhD in Medical sciences, Orthopedic Dentist, Assistant at the Department of Pharmacology of the Stavropol State Medical University, Stavropol, Russia
serg_yuriy@mail.ru

Sergey N. GARAZA ORCID ID 0000-0002-3929-9252

Grand PhD in Medical sciences, Professor, Head of the Department of Propaedeutics of Dental Diseases, Stavropol State Medical University, Stavropol, Russia
s.nik56@mail.ru

Dmitry V. STOMATOV ORCID ID 0000-0002-3271-971X

PhD in Medical sciences, Associate Professor of the Department of General Practice Dentistry, Therapeutic Dentistry and Pediatric Dentistry, Penza Institute of Advanced Medical Education – branch of the Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Penza, Russia
grekstom@mail.ru

Maxim L. AKRAMOV ORCID ID 0009-0007-3021-7496

Orthopedic Dentist, Dental Surgeon, Dental Therapist, SK-HOLDING LLC, Moscow, Russia
aurymdent@yandex.ru

Himalay K. GEZUYEV ORCID ID 0009-0009-8612-4234

Orthopedic Dentist, Dental Surgeon, DENTA-CITY LLC, Grozny, Russia
denta_city@mail.ru

Rustam M. OMAROV ORCID ID 0000-0001-8843-4580

Orthopedic Dentist, Dental Surgeon, LLC «Dental clinic Smile», Nyagan, Russia
dr.rustam90@mail.ru

Correspondence address: Yuri A. SERGEEV

Mira str., 310, Stavropol, Russia, 355017 (SSMU)

+7 (906) 4401889

serg_yuriy@mail.ru

For citation:

Avanisyanyan V.M., Dolgalev A.A., Sergeev Yu.A., Garazha S.N., Stomatov D.V., Akramov M.L., Gezuyev G.K., Omarov R.M.

APPLICATION OF THE METHOD OF BIOLOGICALLY ORIENTED BONE MODELING AS A WAY TO RECREATE THE NATURAL STRUCTURE AND STRENGTH UNDER EXPERIMENTAL CONDITIONS. *Actual problems in dentistry*. 2024; 2: 114-121. (In Russ.)

© Avanisyanyan V.M. et al., 2024

DOI: 10.18481/2077-7566-2024-20-2-114-121

Received 07.06.2024. Accepted 24.07.2024

Введение

Обоснование изготовления модели челюсти из материала с характеристиками, схожими с прочностными характеристиками костной ткани, связано с различными областями науки и медицины, в частности, с изучением биомеханики челюсти, разработкой и тестированием новых методов лечения заболеваний и травм челюсти, и особенно значимо при создании индивидуальных протезов и имплантатов [1, 4, 5].

Биологический смысл феномена ремоделирования кости состоит в приспособлении механических свойств кости к постоянно меняющимся условиям окружающей среды. Костная ткань — это уникальный по составу и свойствам биологический композиционный материал со сложной многоуровневой структурной организацией компонентов. Структура кости и состав определяют ее механические свойства, отличающиеся для разных индивидуумов, а механические нагрузки, в свою очередь, влияют на структуру и состав кости (механизм обратного воздействия) [3, 6].

В настоящее время в стоматологии требуется трехмерное изображение зубов и челюстей с целью диагностики и лечения. Имеющиеся интегрированные системы «компьютерного зрения» реконструируют трехмерную модель отдельных зубов, прикуса пациента, а также костный рельеф челюстей с помощью специальных оптических камер. Однако визуальное

разрешение подобных систем недостаточно высокое и не позволяет увидеть все особенности организации челюстей человека [1, 7]. Поэтому не всегда удается максимально точно и полноценно получить данные об индивидуальных особенностях костной организации.

Подобное знание и понимание структуры и функции костной ткани, познаваемое благодаря различным аддитивным технологиям, помогает понять механические свойства и функционал челюсти. Создание модели челюсти из аналогичного материала позволяет провести исследование закономерностей механического поведения с учетом индивидуальных особенностей строения и состава, развитие подхода к определению эффективных механических характеристик костных тканей для разработки и подбора индивидуальных, механически совместимых с костной тканью имплантатов [2]. Эксперименты с различными нагрузками и деформациями также актуальны и необходимы, чтобы лучше понять реакцию костной ткани на различные силы и напряжения [6, 8].

Целью работы стало изучение прочностных свойств натуральной костной ткани на примере нижней челюсти барана с дальнейшим моделированием кости из материала со схожими прочностными характеристиками.

Материалы и методы

Первый этап. Изучение прочностных свойств натуральной костной ткани

Объектами исследования на первом этапе являются образцы нижней челюсти лабораторного животного, заранее подготовленные для проведения доклинических испытаний в соответствии с Европейской Конвенцией по защите животных, принятой в мае 1997 года в ходе многостороннего совещания сторон-участниц Конвенции № 123. Челюсти освежали, отделили от мягких тканей и без обработки консервантами доставили в лабораторию. В двух образцах были удалены моляры для приложения давления непосредственно на альвеолярную кость, другой же образец оставили без изменений, и давление прилагалось на весь зубо-альвеолярный комплекс тканей вместе с моляром.

Челюсть помещалась в специальный винтовой держатель, который крепился центральным винтом на основании универсальной испытательной машины GOTECH AI 7000-S (рис. 1).

Затем вертикально закрепленный нагрузочный элемент опускался к челюсти, позиционировался и соприкасался с альвеолярной костью без приложения давления, как показано на рис. 2.

После настроек машины происходила регистрация нагрузочного вертикального теста и фиксировались полученные данные о прочности кости и ее упругой деформации в специальной программе U60.



Рис. 1. Винтовой держатель испытательной машины GT-AI7000-S
Fig. 1. Screw holder of the GT-AI7000-S test machine



Рис. 2. Вертикально закрепленный нагрузочный элемент, позиционированный и опускаемый к челюсти с дальнейшим приложением давления и проведением нагрузочного теста:
а — давление приходится на челюсть с моляром,
б — давление приходится на челюсть с удаленным моляром, непосредственно на альвеолярную кость

Fig. 2. A vertically fixed load element positioned and lowered to the jaw with further pressure application and a load test:
a – pressure falls on the jaw with a molar,
b – pressure falls on the jaw with a removed molar directly on the alveolar bone

Второй этап. Исследование по нагрузочному напряжению и деформации моделей, имитирующих костную ткань различной плотности

Следующим шагом стало исследование материала для 3D-печати методом фотополимерного наплавления. Были созданы модели в форме кубиков, имитирующие кортикальную и губчатую структуры костной ткани. Модель представляет собой пустотелый кубик с толщиной стенки от 0,8 до 1,2 мм. Внутри она выполнена в виде ячеистой структуры с круглыми порами, имитирующими губчатую костную ткань.

Опытным путем было установлено, что такая структура весьма схожа с реальной структурой человеческой кости. Данные модели были «подготовлены» к установке имплантатов посредством сверления в них отверстий с использованием физиодиспенсера и набора фрез, поставляемых в комплекте для установки имплантатов ЛКО-М. Таким образом было установлено соответствие модификаций модели с костной тканью различной плотности по шкале Хаунсфилда. Модели явились объектами исследования, физико-механические и прочностные свойства которых изучались с помощью серии нагрузочных тестов.

Как отмечалось ранее, объектами исследования явились кубики размерами 1,5*1,5*1,5 см, заранее напечатанные на 3D-принтере с определенными параметрами, такими как плотность укладки слоев, их количество, вид полимерного материала, из которых они были изготовлены. Пример такой модели изображен на рис. 3.

Заданные параметры имитировали различную плотность костной ткани согласно шкале Хаунсфилда. Так, были изготовлены следующие образцы:

- Кубик-образец 0,8*0,2/t1.0-s1.0, имитирующий костную ткань с нормальным уровнем плотности губчатого вещества и кортикальной пластинкой;
- Кубик-образец 0,8*0,2/t1.2-s1.2, имитирующий костную ткань с нормальным уровнем плотности губчатой кости и плотной кортикальной;
- Кубик-образец 0,8*0,2/t1.5-s1.5, имитирующий плотную губчатую структуру;
- Кубик-образец 0,8*0,275/t1.2-s1.2, имитирующий костную ткань с плотными губчатой и корти-

кальной костями, соответствующую плотности кости по шкале Хаусфилда D2;

- Кубик-образец 0,6*0,175/t1.2-s1.2 имитирующий костную ткань с нормальным уровнем плотности губчатой кости и плотной кортикальной;
- Кубик-образец 0,6*0,25/t1.2-s1.2 имитирующий плотную костную ткань с толстым слоем кортикальной пластинки, соответствующую плотности кости по шкале Хаусфилда D1-D2.

Помимо основного комплекта образцов, был также изготовлен второй комплект кубиков с аналогичными параметрами, но с высверленным отверстием на одной из граней. Данное отверстие имитировало подготовленное имплантационное ложе. Таким образом, общее количество испытуемых образцов составило 12 штук.

Испытуемые образцы один за одним помещались в ранее описанный винтовой держатель, который крепился центральным винтом на основание универсальной испытательной машины GOTECH AI 7000S (рис. 4).

Затем вертикально закрепленный нагрузочный элемент, опускался к образцу, позиционировался и соприкасался с испытуемым образцом без приложения давления (рис. 5).

Третий этап. Исследование по нагрузочному напряжению и деформации модели-имитанта нижней челюсти, имитирующей костную ткань

Заключительным этапом данной работы стало исследование по нагрузочному напряжению и деформации модели-имитанта нижней челюсти, имитирующей костную ткань, заранее напечатанной на 3D-принтере с определенными параметрами, такими как плотность укладки слоев, их количество, вид полимерного материала, из которых они были изготовлены (рис. 5).

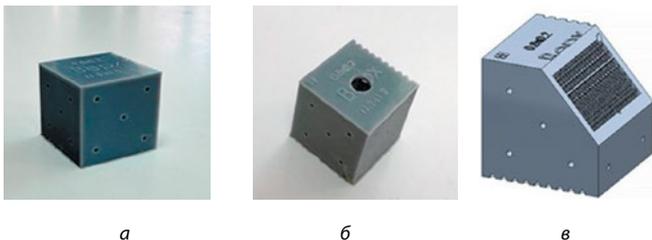


Рис. 3. Пример кубика-образца костной ткани:
а — с целыми гранями, б — с высверленным отверстием на одной из граней, в — 3D-модель со срезанным ребром для демонстрации ячеистой структуры

Fig. 3. An example of a bone sample cube:
a – with whole faces, b – with a drilled hole on one of the faces, c – a 3D model with a cut edge to demonstrate the cellular structure



Рис. 4. Позиционирование кубиков-образцов в испытательной машине с помощью винтового держателя

Fig. 4. Positioning of sample cubes in the testing machine using a screw holder



Рис. 5. Вертикально закрепленный нагрузочный элемент, позиционированный и опускаемый к образцу, с дальнейшим приложением давления и проведением нагрузочного теста

Fig. 5. Vertically fixed load element positioned and lowered to the sample with further application of pressure and carrying out a load test

Заданные параметры 3D-печати имитировали плотность костной ткани согласно шкале Хаунсфилда.

Модель помещалась в специальный винтовой держатель, который крепился центральным винтом на основание универсальной испытательной машины GOTECH AI 7000S. Затем вертикально закрепленный нагрузочный элемент опускался к образцу, позиционировался и соприкасался с испытуемым образцом без приложения давления (рис. 7).

Результаты исследований

Результаты первого этапа исследования

По окончании каждого теста был сформирован отчет о приложенном максимальном давлении в Ньютонах (Н) и пересчет в килограммы (кг). Также происходило построение графика упругой деформации образца (рис. 8).

По окончании нагрузочного теста был сформирован отчет, в котором отражены результаты вертикальной нагрузки на образцы нижней челюсти (табл. 1).



а



б

Рис. 6. Пример модели-образца костной ткани:

а – вид сверху, б – вид сбоку

Fig. 6. Example of a bone tissue sample model: a – top view, b – side view



Рис. 7. Винтовой держатель для крепления моделей, фиксированный центральным винтом на основание универсальной испытательной машины GOTECH AI 7000S

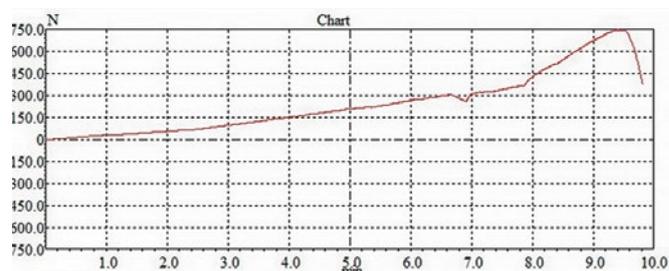
Fig. 7. Screw holder for mounting models fixed by a central screw on the base of the universal GOTECH AI 7000S testing machine

Таблица 1

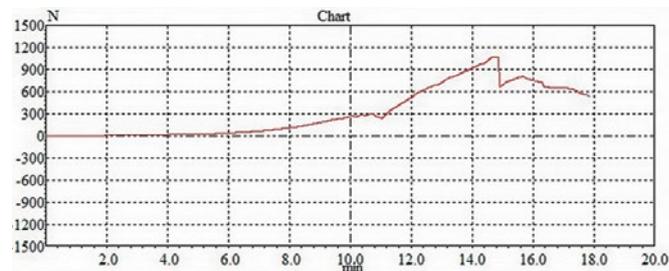
Результаты исследования предела прочности модели нижней челюсти

Table 1. Results of the study of the tensile strength of the mandible model

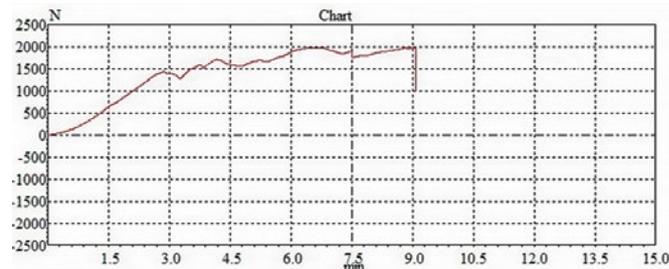
№ нагрузочного теста по порядку	Образец модели	Величина нагрузки, вызвавшая разрушение образца, в Ньютонах, Н	Величина нагрузки, вызвавшая разрушение образца, в кг
1	Образец нижней челюсти без моляра 1	748,2	75
2	Образец нижней челюсти без моляра 2	1074,1	107,5
3	Образец нижней челюсти с молярами 3	2003,6	200



а



б



в

Рис. 8. Результирующие графики приложения нагрузок:

а — нижней челюсти без моляра 1, б — нижней челюсти без моляра 2, в — нижней челюсти с молярами

Fig. 8. The resulting graphs of the application of loads: a – mandible without molar 1, b – mandible without molar 2, c – mandible with molars

Таблица 2

Результаты исследования предела прочности кубиков-образцов, имитирующих костную ткань различной плотности

Table 2. Results of the study of the tensile strength of sample cubes simulating bone tissue of various densities

№ по порядку	Кубик-образец костной ткани, параметры образца	Величина нагрузки, вызвавшая разрушение образца, в Ньютонах, Н	Величина нагрузки, вызвавшая разрушение образца, в килограммах, кг
1	КО целый* 0,8*0,2/t1.0-s1.0	327,1	33
2	КО целый 0,8*0,2/t1.2-s1.2	508,2	51
3	КО целый 0,8*0,2/t1.5-s1.5	508,8	51
4	КО целый 0,8*0,275/t1.2-s1.2	986,3	99
5	КО целый 0,6*0,175/t1.2-s1.2	386,3	39
6	КО целый 0,6*0,25/t1.2-s1.2	1842,1	184
7	КО ложе** 0,8*0,2/t1.0-s1.0	156,3	15,6
8	КО ложе 0,8*0,2/t1.2-s1.2	200,7	20
9	КО ложе 0,8*0,2/t1.5-s1.5	265,9	26,6
10	КО ложе 0,8*0,275/t1.2-s1.2	1339,4	134
11	КО ложе 0,6*0,175/t1.2-s1.2	328,3	33
12	КО ложе 0,6*0,25/t1.2-s1.2	1648,2	165

Примечание: * целый — значит, что у кубика-образца все грани были целые;

** ложе — значит, что на одной грани имеется высверленное отверстие, имитирующее имплантационное ложе

По итогам проделанной работы можно заключить следующее: полученные количественные результаты позволили оценить степень прочности костной ткани во время аналогичных жевательных нагрузок. Благодаря такому системному подходу в изучении физико-механических свойств настоящей челюсти, приближенной к челюсти человека, стало возможно прогнозировать результаты и минимизировать вероятные риски деструктуризации и вертикального разрушения. Количественные результаты нагрузочных тестов позволяют спрогнозировать прочностные результаты, при этом не расходуя время и материальные ресурсы на выявление и предикцию рисков.

Полученные данные составляют первый, начальный этап исследования прочностных характеристик костной ткани; в дальнейшем планируется работа по исследованию прочностных характеристик материалов, которые могут использоваться в качестве сырья для изготовления моделей костной ткани, в частности, нижней челюсти с механическими прочностными характеристиками, аналогичными костной структуре.

Результаты второго этапа исследования

После подготовки образцов и настроек машины происходила регистрация нагрузочного вертикального теста и фиксировались полученные данные о прочности материала и его упругой деформации в специальной программе U60. По окончании каждого теста был сформирован отчет о приложенном максимальном давлении в Ньютонах (Н) и пересчет в килограммы (кг). Также происходило построение графика упругой деформации образца (рис. 9).

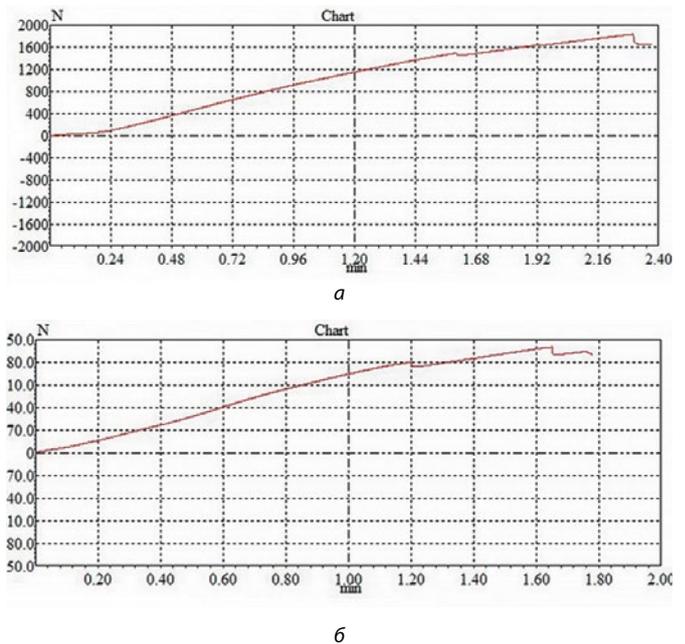


Рис. 9. Пример построения графика упругой деформации испытуемых образцов во время проведения нагрузочных тестов:
а — с целыми гранями,
б — с высверленным отверстием на одной из граней

Fig. 9. An example of plotting the elastic deformation of test samples during load tests:
a – with whole faces,
b – with a drilled hole on one of the faces

Результаты исследования предела прочности модели нижней челюсти
Table 3. Results of the study of the tensile strength of the mandible model

№ нагрузочного теста по порядку	Образец модели	Величина нагрузки, вызвавшая разрушение образца, в Ньютонах, Н	Величина нагрузки, вызвавшая разрушение образца, в килограммах, кг
1	Модель-имитант нижней челюсти	855,3	85,6

По окончании серии нагрузочных тестов была сформирована сводная таблица 2, в которой отражены результаты вертикальной нагрузки на образцы без и с имплантационным ложем.

Следует отметить, что после подсчетов прочность испытуемых образцов при наличии отверстия уменьшилась в среднем на 37%. Однако у испытуемого образца № 4 и его аналога № 10 наблюдалась обратная корреляция: при создании отверстия прочность образца не только не уменьшилась, она возросла со значения в 986 Н до 1339 Н.

Полученные количественные результаты позволили оценить степень прочности материалов и смоделировать поведение костной ткани во время аналогичных жевательных нагрузок. Благодаря компьютерному моделированию, математическим расчетам и 3D-печати стало возможно прогнозировать результаты и минимизировать риски деструктуризации и вертикального разрушения материалов.

Результаты третьего этапа исследования

После подготовки образцов и настроек машины происходила регистрация нагрузочного вертикального теста и фиксировались полученные данные о прочности материала и его упругой деформации в специальной программе U60. По окончании каждого теста был сформирован отчет о приложенном максимальном давлении в Ньютонах (Н) и пересчет в килограммы (кг). Также происходило построение графика упругой деформации образца (рис. 10).

По окончании нагрузочного теста был сформирован отчет, в котором отражены результаты вертикальной нагрузки на модель нижней челюсти (табл. 3).

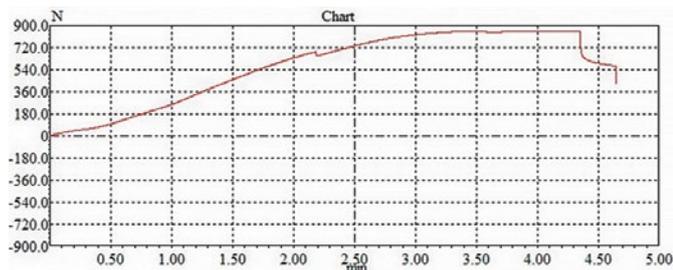


Рис. 10. Отчет-график упругой деформации испытуемого образца-имитанта нижней челюсти во время нагрузочного теста

Fig. 10. The report is a graph of the elastic deformation of the test sample-imitator of the lower jaw during the stress test

Выводы

В ходе экспериментального исследования были получены результаты, которые позволили сделать следующие выводы:

Изученные прочностные характеристики натурального образца костной ткани и понимание структурной организации кости позволили уточнить цифровую модель нижней челюсти, а впоследствии на ее основании, с помощью аддитивных технологий, был создан имитант челюсти с природными заданными параметрами плотности и организации костной ткани.

Описанная методика получения подобных моделей позволила воссоздать природные свойства челюсти почти со 100% точностью, что подтверждается повторными тестами и соответствием полученных данных данным, которые наблюдались при исследовании деформации реальной кости.

Благодаря компьютерному моделированию, математическим расчетам и 3D-печати удалось создать модель из искусственных материалов, сходную с костной тканью, пригодную для более детального изучения поведения костной ткани, оценки рисков возможного перелома кости, их минимизации, выявления максимального запаса прочности и механического износа, а также использования результатов в клинической практике для успешного проведения имплантаций и грамотного расчета ортопедических конструкций с дальнейшим протезированием на имплантатах.

Заключение

Полученные количественные результаты позволяют оценить степень прочности материалов и смоделировать поведение костной ткани во время аналогичных жевательных нагрузок. Количественные результаты нагрузочных тестов позволяют спрогнозировать прочностные результаты настоящей кости, при этом не расходуя время и материальные ресурсы на выявление и предикцию рисков.

Технология изготовления данной модели может быть направлена на регистрацию интеллектуальной собственности как «полезная модель». В дальнейшем изготовленные таким образом модели могут применяться в качестве фантомных образцов при обучении и повышении квалификации хирургов-стоматологов. Не стоит забывать о том, что каждая биологическая ткань имеет свои механические характеристики, в частности костная ткань. Поэтому не существует идеального материала, полностью совместимого с орга-

низмом, соответствующего всем его анатомо-физиологическим и биомеханическим свойствам. Не может существовать идеального имитанта для облегчения и проецирования разнообразных клинических ситу-

аций, однако с помощью подбора схожих по прочностным характеристикам искусственных материалов можно добиться почти 100% результата по имитации натурального вещества.

Литература/References

1. Хлусов И.А., Пичугин В.Ф., Сурменова М.А., Сурменев Р.А. Основы биомеханики биосовместимых материалов и биологических тканей. Учебное пособие (переработанное и дополненное). Томск : Издательство Томского политехнического университета. 2023:163. [I.A. Khlusov, V.F. Pichugin, M.A. Surmeneva, R.A. Surmenev. Fundamentals of biomechanics of biocompatible materials and biological tissues. A textbook (revised and supplemented). Tomsk : Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 2023:163. (In Russ.)]. <https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SURMENEV/rabota/%D0%A3%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D1%8F%20%D0%B8%20%D0%B4%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%B0%D1%8F%20%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D0%A3%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D0%BE%D0%B5%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%B5-%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%8B%20%D0%B1%D0%B8%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%85.pdf>
2. Сергеев Ю.А., Аванисян В.М., Долгалев А.А., Чониашвили Д.З. Возможности применения аддитивных технологий при создании и разработке дентального имплантата (обзор литературы). Вестник новых медицинских технологий. 2023;30(4):22-26. [Yu.A. Sergeev, V.M. Avanisyan, A.A. Dolgalev, D.Z. Choniashvili. Possibilities of using additive technologies in the creation and development of a dental implant (literature review). Bulletin of new medical technologies. 2023;30(4):22-26. (In Russ.)]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56941587>
3. Chen P., Nikoyan L. Guided Implant Surgery: A Technique Whose Time Has Come // Dent. Clin. N. Am. – 2021;65:67-80. doi: 10.1016/j.cden.2020.09.005.
4. Colombo M., Mangano C., Mijiritsky E., Krebs M., Hauschild U., Fortin T. Clinical applications and effectiveness of guided implant surgery: A critical review based on randomized controlled trials // BMC Oral Health. – 2017;17:150. doi: 10.1186/s12903-017-0441.
5. Jaber S.T., Hajeer M.Y., Khattab T.Z., Mahaini L. Evaluation of the fused deposition modeling and the digital light processing techniques in terms of dimensional accuracy of printing dental models used for the fabrication of clear aligners // Clin. Exp. Dent. Res. – 2021;7:591-600. doi: 10.1002/cre2.366.
6. Minch L.E., Sarul M., Nowak R., Kawala B., Antoszevska-Smith J. Orthodontic intrusion of periodontally-compromised maxillary incisors: 3-dimensional finite element method analysis // Adv. Clin. Exp. Med. – 2017;26:829-833. doi: 10.17219/acem/61349.
7. Paradowska-Stolarz A., Malysa A., Mikulewicz M. Comparison of the Compression and Tensile Modulus of Two Chosen Resins Used in Dentistry for 3D Printing // Materials. – 2022;15:8956. doi: 10.3390/ma15248956.
8. Tack P., Victor J., Gemmel P., Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: A systematic literature review // Biomed. Eng. Online. – 2016;15:115. doi: 10.1186/s12938-016-0236-4