

К. З. Хайрнасов

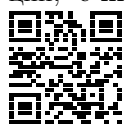
АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБНОГО ИМПЛАНТАТА С КОРОНКОЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗКАХ

Московский государственный строительный университет (Национальный
исследовательский университет), Москва, Россия

Аннотация. Рассматриваются вопросы контактного взаимодействия и напряженно-деформированное состояние зубных коронок и имплантатов при эксплуатационных нагрузках. Задача решается методом конечных элементов в системе автоматизированного проектирования. Сходимость результатов проверяется сгущением сетки конечных элементов. Коронки состоят из нескольких материалов с характеристиками, приведенными в работе. В результате проведенного исследования определены прочностные характеристики, рассматриваемой модели коронок и имплантатов при эксплуатационных нагрузках. Полученные материалы могут быть применены в практике протезирования зубов.

Ключевые слова: дентальный имплантат, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, запасы прочности.

Хайрнасов Камил Зайнутдинович, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; e-mail: kamilh@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0111-2947>; AuthorID: 600738



для цитирования: Хайрнасов К. З. Анализ напряженно-деформированного состояния зубного имплантата с коронкой при эксплуатационных нагрузках // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2026. № 1(67). С. 126–136. DOI: 10.37972/chgpu.2026.67.1.019. EDN: JIZAАK

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

K. Z. Khayrnasov

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A DENTAL IMPLANT WITH A CROWN UNDER OPERATIONAL LOADS

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow,
Russia

Abstract. This paper examines the contact interaction and stress-strain behavior of dental crowns and implants under operational loads. The problem is solved using the finite element method in a computer-aided design system. The convergence of the results is verified by refining the finite element mesh. The crowns are composed of several materials with the characteristics given in the paper. The study determined the strength characteristics of the crown and implant models under operational loads. The resulting materials can be used in dental prosthetics.

Keywords: dental implant, stress-strain behavior, finite element method, safety margins.

Kamil Z. Khayrnasov, PhD, Assoc. Prof.; e-mail: kamilh@mail.ru;
<https://orcid.org/0000-0003-0111-2947>; AuthorID: 600738



to cite this article: Khayrnasov K. Z. Analysis of the stress-strain state of a dental implant with a crown under operational loads // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2026. No 1(67). p. 126–136. DOI: 10.37972/chgpu.2026.67.1.019

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

1. Введение. Современные стоматологические имплантаты – сложное изделие, состоящее из различных материалов и сложных геометрических поверхностей, требует большого объёма теоретических и экспериментальных исследований в процессе проектирования и эксплуатации. Поэтому вопросы изготовления надежных изделий, заменяющих природные экземпляры важная и актуальная тема. Для математического моделирования современных имплантатов применяются системы автоматизированного проектирования и численные методы расчета: метод конечных элементов, позволяющие определить прочностные характеристики имплантатов при различных нагрузках и по проведенным расчетам изготовить прототипы для проведения клинических испытаний. Клинические испытания на прочность имплантатов, эксплуатационным испытаниям имплантатов на усталостную прочность, нелегированного титана применяемого в имплантатах регламентированы нормативными документами [1–3]. В работе [4] проведены экспериментальные исследования пористых титановых имплантатов на растяжение с фиксацией деформаций. Проведенные исследования способствуют широкому применению высокопористых титановых имплантатов, полученных с применением 3D- печати, для восстановительной и ревизионной хирургии в отношении, как замещения костных дефектов, так и восстановления поврежденных мышц. В статье [5] изучено влияние цилиндрического и конусного дентальных имплантатов на прочностные характеристики. В результате проведенных исследований выявлено преимущество конического соединения, перед плоскостным. В работе [6] проведено сравнение имплантатов фирмы цилиндрической формы и конусной формы методом конечных элементов в физически нелинейной постановке. В результате проведенных исследований выявлено, что цилиндрические имплантаты имеют лучшие прочностные характеристики по сравнению с имплантатом конической формы. В работе [7] с применением современных САПР проведено статическое и динамическое исследование имплантатов отличающихся способом соединения имплантата. Осуществлен сравнительный анализ локализации напряженных областей и распределения нагрузки при приложении различных осевых нагрузок. Выявлено, что предложенный вариант соединения предложенным видом способен выдерживать гораздо большие нагрузки по сравнению со стандартным вариантом. В работе [8] рассмотрены вопросы исследования напряжённо-деформированного состояния имплантатов из керамики и от их формы. В работе [9] исследуется напряженно-деформированное состояния имплантатов методом граничных интегральных уравнений. Установлено, что наибольшие напряжения возникают в первом витке резьбы имплантата. В статье [10] рассматриваются несъемные ортопедические конструкции, опирающиеся на дентальные имплантаты в дистальных отделах верхней и нижней челюсти, при действии вертикальной эксплуатационной нагрузке, характерной для жевательной нагрузки.

2. Методы решения. При изготовлении стоматологических имплантатов с пломбой применяются несколько видов материалов, для получения прочной конструкции.

№	Наименование материала	Модуль упругости, (сдвига) Па	Коэффициент Пуассона	Предел прочности, МПа
1	Губчатая кость	$1,37 \cdot 10^9$	0.3	23
2	Кортикальная кость	$1,37 \cdot 10^{10}$	0.3	90-150
3	Дентин	$1,86 \cdot 10^{10}$	0.31	1358
4	Керамика	$7,0 \cdot 10^{10}$	0.2	320
5	Латекс	$6,89 \cdot 10^7$	0.45	
6	Титан	$1,1 \cdot 10^{11}$ ($4,1 \cdot 10^{10}$)	0.32	1048
7	Зубная эмаль	$8,1 \cdot 10^{10}$	0.3	4009
8	Пломба	$6,9 \cdot 10^9$	0,3	400

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов, применяемых в конструкции

Для моделирования имплантата применялась бесконтактная система ATOS, обеспечивающая точность 5 мкм. При расчетах на конструкцию действовала вертикальная нагрузка 100Н, показанная на рис. 5. Размерные характеристики конструкции составляли 38.8 мм по оси X, 38.0 мм по оси Y и 69.5 мм по оси Z (рис. 2).

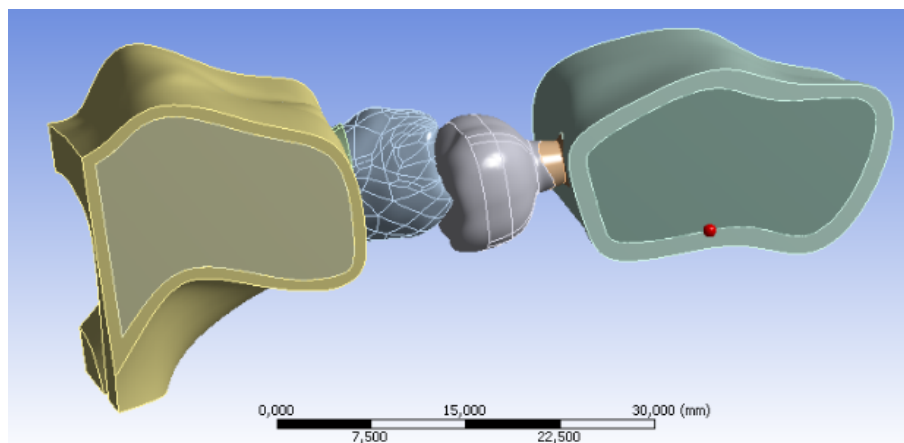


Рис. 1. Модель имплантата с пломбой (справа) и естественного зуба

В качестве метода решения в системе автоматизированного проектирования применяется метод конечных элементов. Сходимость решения проверялся сгущением сетки конечных элементов: сравнивались решения исходного разбиения

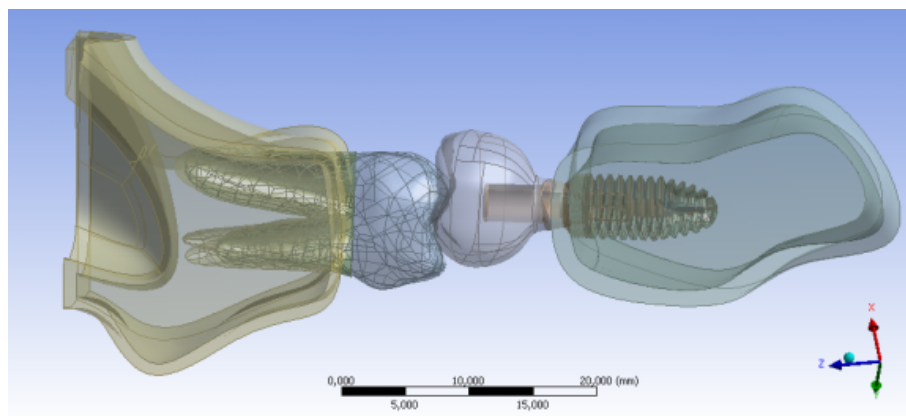


Рис. 2. Структура естественного зуба и имплантата внутри

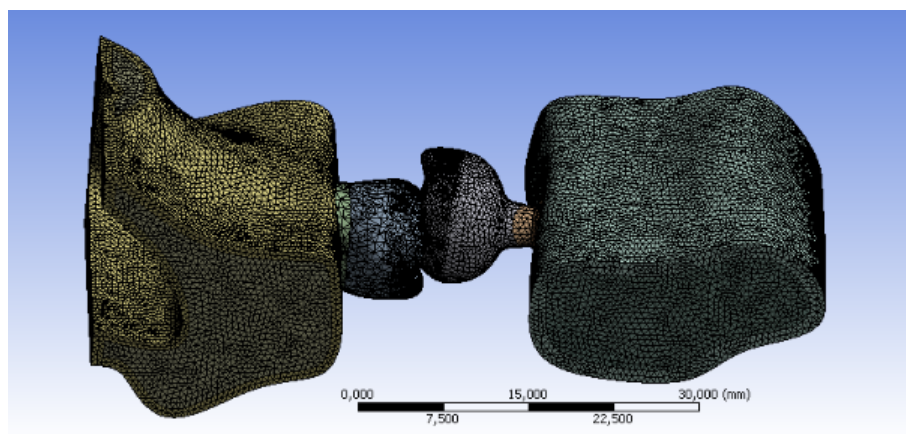


Рис. 3. Конечно-элементная аппроксимация конструкции. Число конечных элементов составило 1356214

и при полуторном увеличении числа конечных элементов по сравнению с исходным. Сравнивались напряженно-деформированные состояния исходного состояния и сгущенной сетки конечных элементов. Если результаты отличались не более чем на 3%, то исходное состояние разбиения принималось достаточным для получения достоверного решения, если нет, то процедура сгущения сетки конечных элементов продолжалась.

Число конечных элементов конструкции составило 1356214. В местах соприкосновения поверхностей естественного зуба и имплантата коэффициент трения принимался 0,2.

Решение задачи определения напряженно-деформированного состояния имплантата под нагрузкой сводится к решению системы алгебраических уравнений в физически нелинейной постановке.

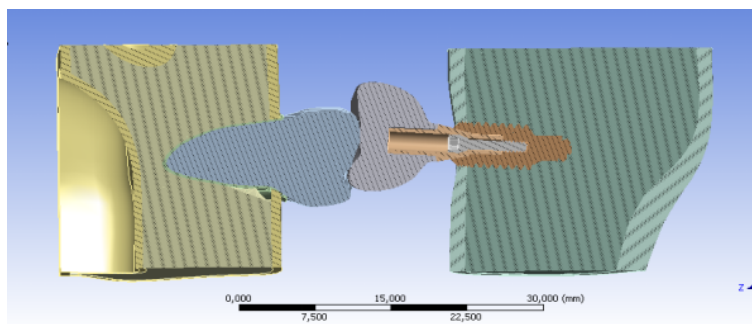


Рис. 4. Конструкция имплантата с пломбой и естественного зуба в разрезе

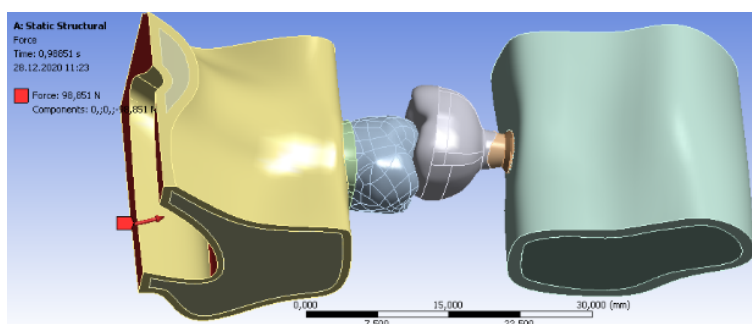


Рис. 5. Осевая нагрузка

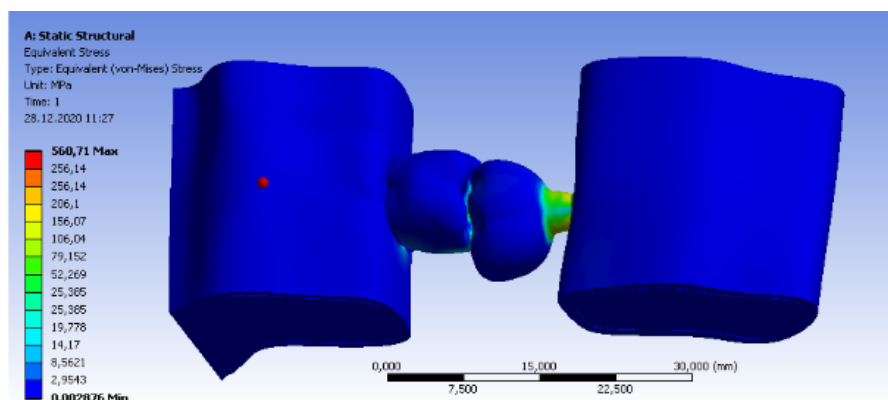


Рис. 6. Общее напряженное состояние конструкции. Максимальное напряжение по Мизесу 256МПа.

В результате проведенного исследования модель конструкции имплантата с пломбой и естественного зуба аппроксимирована конечными элементами (рис. 3), Подтверждена сходимость аппроксимации, получено напряженно-деформированное состояние имплантата с пломбой при соприкосновении с естественным зубом (рис. 6-11), определены перемещения элементов конструкции

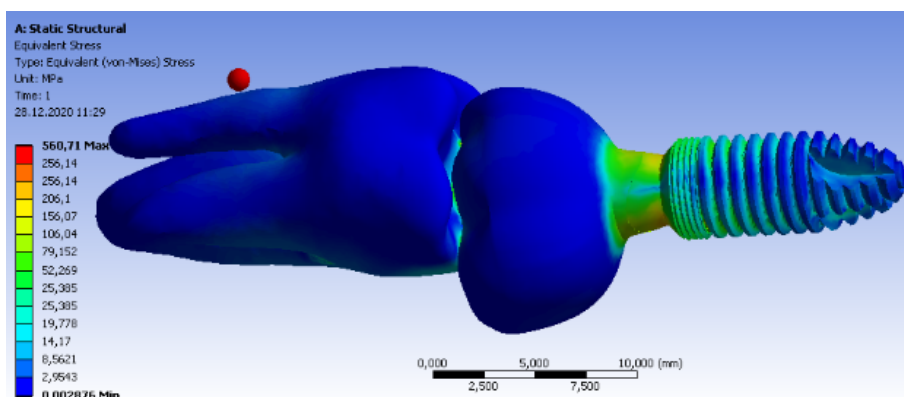


Рис. 7. Распределение напряжений в имплантате материала титан. Максимальное напряжение по Мизесу 256МПа. В материале из Дентина 156МПа.

(рис. 12, 13). Вычислен запас прочности материалов имплантата с пломбой и естественного зуба, приведенные в таблице 2.

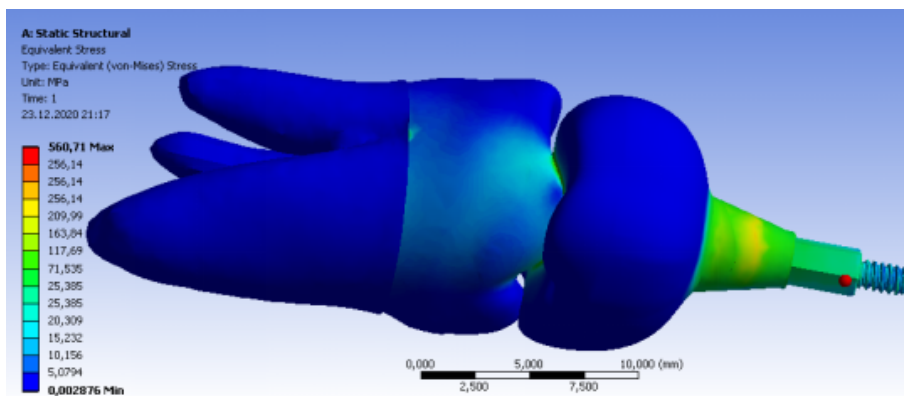


Рис. 8. Распределение напряжений в имплантате. Максимальное напряжение по Мизесу 256МПа в материале из титана и 156МПа в материале из Дентина.

В табл. 2 показаны запасы прочности материалов, применяемых в конструкции.

3. Выводы. В результате проведенного исследования напряженно-деформированного состояния конструкции имплантата с пломбой и естественного зуба при их эксплуатации получены значения напряжений и деформаций в 8 элементах конструкции. Определены максимальные напряжения и деформации в элементах конструкции. Приведены модели имплантатов с пломбой и

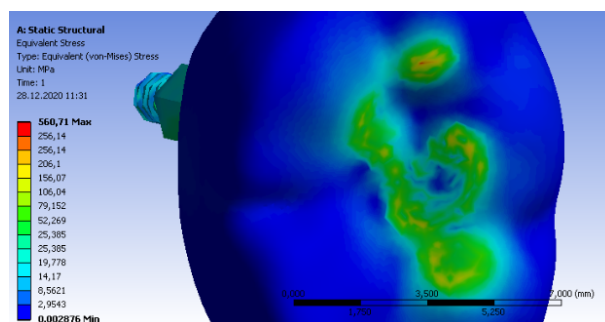


Рис. 9. Распределение напряжений на поверхности имплантата. Максимальное напряжение по Мизесу 156МПа в материале керамика имплантата.

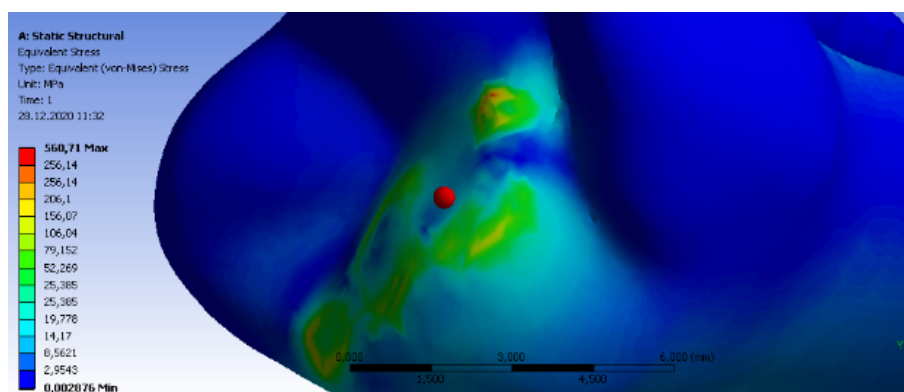


Рис. 10. Распределение напряжений на поверхности имплантата. Максимальное напряжение по Мизесу 256МПа в материале зубной эмали.

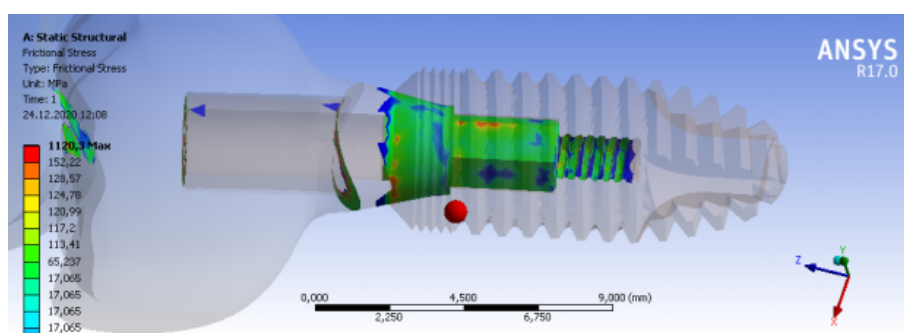


Рис. 11. Распределение напряжений внутри имплантата. Максимальное напряжение по Мизесу 152МПа в материале титан имплантата.

естественного зуба. Расчеты проиллюстрированы на 13 рисунках. По результатам, проведенных расчетов определены запасы прочности материалов, входящих в конструкцию. Минимальный запас прочности составил 1,5 (табл.2).

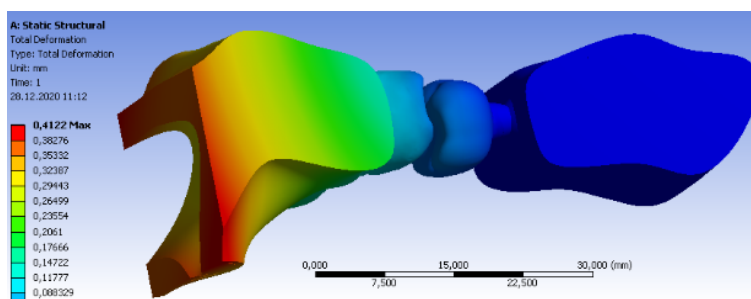


Рис. 12. Распределение перемещений имплантата. Максимальное перемещение 0,4122 мм.

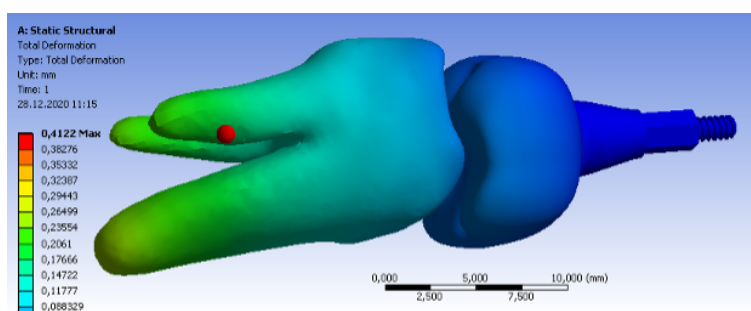


Рис. 13. Распределение перемещений внутри конструкции. Максимальное перемещение 0,4122 мм.

Наименование материала	Предел прочности, МПа	Максимальное напряжение в конструкции, МПа,	Запас прочности
Керамика	320	156 (9)	2,1
Титан	880	256 (6-8,11)	3,4
Пломба	400	156 (9)	2,5
Зубная эмаль	3000	256 (10)	11,7
Губчатая кость	23	10 (6,7)	2,3
Кортикальная кость	90	60 (6,7)	1,5
Дентин	369	156 (7, 8)	2,3

Таблица 2. Запасы прочности и максимальные напряжения в конструкции

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. 100%.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. 100%.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. This study was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 14801-2012. Методы определения усталостной прочности внутрикостных стоматологических имплантатов. – 2012. – kzn.etalon-profit.ru; files.stroyinf.ru.
2. ГОСТ Р ИСО 12189-2017. Метод усталостных испытаний сборных спинальных имплантатов с использованием передней опоры. – 2017. – base.garant.ru; ohranatruda.ru.
3. ГОСТ Р ИСО 5832-2-2014. Характеристики и методы испытания нелегированного титана, используемого в производстве хирургических имплантатов. – 2014. – gost.gtsever.ru.
4. Тихилов Р. М., Шубняков И. И., Денисов А. О. Костная и мягкотканная интеграция пористых титановых имплантатов (экспериментальное исследование) // Травматология и ортопедия России. – 2018. – Т. 24, № 2.
5. Прялкин С. В., Рубникович С. П., Бусько В. Н. Анализ прочностных характеристик цементно-винтовой фиксации мульти-юнит абатментов к дентальным имплантатам с плоскостным и коническим типом соединения в эксперименте // Медицинский журнал. – 2025. – № 4.
6. Расчет деформаций и оценка статической прочности импланционных систем различных форм и конструкций на примере дентальных имплантатов LIKO 4X10 / А. В. Сергеев, А. А. Долгалев, В. М. Ованесян [и др.] // Медицинский альманах. – 2023.
7. Головки А. С. Изучение супраструктуры стоматологических имплантатов на основе метода конечных элементов // Современная стоматология. – 2019. – № 4. – С. 32–36.
8. Федорова Н. Б. Исследование напряженно-деформированного состояния стоматологических имплантатов из керамики в зависимости от их формы и степени минерализации кости // Российский журнал биомеханики. – 2019. – Т. 23, № 3. – С. 451–459.
9. Перельмутер М. Н. Исследование напряженно-деформированного состояния стоматологических имплантатов методом граничных интегральных уравнений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 2. – С. 83–95. – DOI: 10.15593/peim.mech/2018.2.08.
10. *Waesdorp J., Reynolds M. A.* Allogeneic bone onlay grafts for alveolar ridge augmentation: a systematic review // International Journal of Oral and Maxillofacial Implants. – 2010. – Vol. 25, no. 3. – P. 525–531.

REFERENCES

1. GOST R ISO 14801-2012. Methods for Determining the Fatigue Strength of Endosseous Dental Implants. – 2012. – kzn.etalon-profit.ru; files.stroyinf.ru.
2. GOST R ISO 12189-2017. Fatigue Test Method for Prefabricated Spinal Implants Using an Anterior Support. – 2017. – base.garant.ru; ohranatruda.ru.
3. GOST R ISO 5832-2-2014. Characteristics and Test Methods of Unalloyed Titanium Used in the Manufacture of Surgical Implants. – 2014. – gost.gtsever.ru.
4. *Tikhilov R. M., Shubnyakov I. I., Denisov A. O.* Bone and Soft Tissue Integration of Porous Titanium Implants (Experimental Study) // Traumatology and Orthopedics of Russia. – 2018. – Vol. 24, no. 2.
5. *Pryalkin S. V., Rubnikovich S. P., Busko V. N.* Analysis of the Strength Characteristics of Cement-Screw Fixation of Multi-Unit Abutments to Dental Implants with Planar and Conical Connection Types in an Experiment // Medical Journal. – 2025. – No. 4.
6. Calculation of Deformations and Assessment of Static Strength of Implantation Systems of Various Shapes and Designs Using LIKO 4X10 Dental Implants as an Example / A. V. Sergeev, A. A. Dolgalev, V. M. Ovanesyan, [et al.] // Medical Almanac. – 2023.
7. *Golovko A. S.* Study of the Superstructure of Dental Implants Based on the Finite Element Method // Modern Dentistry. – 2019. – No. 4. – P. 32–36.
8. *Fedorova N. B.* Study of the Stress-Strain State of Ceramic Dental Implants Depending on Their Shape and the Degree of Bone Mineralization // Russian Journal of Biomechanics. – 2019. – Vol. 23, no. 3. – P. 451–459.
9. *Perelmuter M. N.* Study of the Stress-Strain State of Dental Implants Using the Boundary Integral Equation Method // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. – 2018. – No. 2. – P. 83–95. – DOI: 10.15593/peim.mech/2018.2.08.
10. *Wassdorp J., Reynolds M. A.* Allogeneic Bone Onlay Grafts for Alveolar Ridge Augmentation: A Systematic Review // International Journal of Oral and Maxillofacial Implants. – 2010. – Vol. 25, no. 3. – P. 525–531.