

# МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И ТЕХНОЛОГИИ

---

Научная статья

УДК 615.464: 666.5].03: 616.314-089.28.036.8

DOI: 10.17816/pmj40580-89

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Г.И. Рогожников<sup>1</sup>, О.А. Шулятникова<sup>1\*</sup>, О.С. Гилева<sup>1</sup>, А.Г. Рогожников<sup>1</sup>, В.Н. Никитин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера,

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Российская Федерация

## FUNCTIONAL CAPABILITIES OF CERAMIC NANOSTRUCTURES USED FOR REINFORCEMENT OF POLYMER STRUCTURAL MATERIALS FOR DENTAL PURPOSES

**G.I. Rogozhnikov<sup>1</sup>, O.A. Shuliatnikova<sup>1\*</sup>, O.S. Gileva<sup>1</sup>, A.G. Rogozhnikov<sup>1</sup>, V.N. Nikitin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>E.A. Vagner Perm State Medical University,

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation

---

© Рогожников Г.И., Шулятникова О.А., Гилева О.С., Рогожников А.Г., Никитин В.Н., 2023

тел. +7 342 233 08 97

e-mail: anasko06@mail.ru

[Рогожников Г.И. – профессор кафедры ортопедической стоматологии, доктор медицинских наук, профессор; Шулятникова О.А. (\*контактное лицо) – профессор кафедры ортопедической стоматологии, доктор медицинских наук, доцент; Гилева О.С. – заведующая кафедрой терапевтической стоматологии и пропедевтики стоматологических заболеваний, доктор медицинских наук, профессор; Рогожников А.Г. – доцент кафедры ортопедической стоматологии, доктор медицинских наук, доцент; Никитин В.Н. – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика, механика и биомеханика»].

© Rogozhnikov G.I., Shuliatnikova O.A., Gileva O.S., Rogozhnikov A.G., Nikitin V.N., 2023

tel. +7 342 233 08 97

e-mail: anasko06@mail.ru

[Rogozhnikov G.I. – MD, PhD, Professor, Professor of the Department of Prosthetic Dentistry; Shuliatnikova O.A. (\*contact person) – MD, PhD, Associate Professor, Professor of the Department of Prosthetic Dentistry; Gileva O.S. – MD, PhD, Professor, Head of the Department of Therapeutic Dentistry and Propedeutics of Dental Diseases; Rogozhnikov A.G. – MD, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Prosthetic Dentistry; Nikitin V.N. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Calculus Mathematics, Mechanics and Biomechanics].

**Цель.** Биомеханическое обоснование возможности применения пострезекционного протеза obturator, выполненного из полиамидного термоинжекционного материала, дисперсионно армированного наноструктурированным диоксидом титана.

Неуклонный рост частоты выявления новообразований челюстно-лицевой области обуславливает актуальность проблемы комплексного лечения и стоматологической реабилитации пациентов с приобретенными дефектами челюстных костей. В этом ключе перспективным направлением стоматологического материаловедения является разработка наноструктурированных конструкционных материалов с улучшенными прочностными параметрами, к которым относится диоксид циркония и диоксид титана. Спектр функциональных возможностей применения диоксида циркония различного состава в качестве конструкционного материала для зубного протезирования хорошо изучен, хотя потенциал возможностей применения в ортопедии полностью не исчерпан. В развитии проблемы параллельно изучаются функциональные возможности, преимущества и проблемные вопросы применения в ортопедической стоматологии различных технологических вариантов диоксида титана.

**Материалы и методы.** В работе применен биомеханический метод математического моделирования. Построение расчётной конечно-элементной модели включало: определение механических свойств материалов; построение геометрической модели; создание конечно-элементной сетки; задание граничных условий силовых воздействий.

**Результаты.** Предварительно проведенные исследования физико-механических характеристик армированного полиамида показали увеличение максимальных напряжений и модуля Юнга на 8,4 и на 7,2 % соответственно, что соответствует нормативам стандарта ISO 1567: 1999. Результаты биомеханических расчетов прочности элементов протеза-obturator: уровень максимальных напряжений в пределах показателей прочности при горизонтальной нагрузке равен 45,25 МПа, при вертикальной нагрузке (эквивалентное значение напряжений) – 30,88 МПа, максимальные напряжения в зоне контакта с окклюзионной накладкой – 35,00 МПа, деформации, определенные в области нагрузки, – 0,001, а наличие опорно-удерживающих кламмеров распределяет напряжения на поверхности опорного зуба и снижает их на 11 %. Данные факты предопределяют достаточную стабильность и хорошую фиксацию пострезекционного протеза.

**Выводы.** По результатам проведенных физико-механических исследований верхнечелюстного протеза-obturator из термоинжекционного полиамида, армированного наноразмерным диоксидом титана, определены необходимые прочностные характеристики, конструкции, что указывает на перспективы его клинического применения в практике врача ортопеда-стоматолога для лечения пациентов с приобретенными дефектами челюстных костей.

**Ключевые слова.** Дефект верхней челюсти, челюстной протез, биомеханический расчет, полиамидный базисный материал, керамические материалы на основе диоксида циркония, диоксид титана.

**Objective.** To present biomechanical substantiation of the possibility of using a post-resection obturator prosthesis made of polyamide thermoinjection material, dispersion-reinforced with nanostructured titanium dioxide.

**Materials and methods.** The biomechanical method of mathematical modeling was applied in the work. The construction of the calculated finite element model included: determination of the mechanical properties of materials; construction of a geometric model; creation of a finite element grid; setting the boundary conditions of force effects.

**Results.** Preliminary studies of the physical and mechanical characteristics of reinforced polyamide showed an increase in maximum stresses and Ung's modulus by 8,4 % and 7,2 %, respectively, which corresponds to the standards of ISO 1567: 1999. The results of biomechanical calculations of the strength of the elements of the prosthesis-obturator are the following: the level of maximum stresses within the strength indicators under horizontal load is 45,25 MPa, under vertical load (equivalent stress value) – 30,88 MPa, maximum stresses in the contact area with the occlusal pad – 35,00 MPa, deformations determined in the load area – 0,001, and the presence of retaining clasps distributes stresses on the surface of the supporting tooth and reduces them by 11 %. These facts determine a sufficient stability and good fixation of the post-resection prosthesis.

**Conclusions.** Based on the results of physical and mechanical studies of the maxillary prosthesis-obturator made of thermo-injection polyamide reinforced with nanoscale titanium dioxide, the necessary strength characteristics and structures were determined, that indicates the prospects for its clinical application in the practice of an orthopedic dentist for the treatment of patients with acquired defects of the jaw bones.

**Keywords.** Defect of upper jaw, jaw prosthesis, biomechanical calculation, polyamide base material, ceramic materials based on zirconium dioxide, titanium dioxide.

## ВВЕДЕНИЕ

Профилактика и лечение онкологических заболеваний у населения многих стран мира сохраняет свою актуальность как сложнейшая, до конца не решенная задача медико-социальной значимости. По данным Международного агентства по изучению рака (International Agency for Research on Cancer, IARC; WHO), в мире ежегодно регистрируется более 12 млн новых случаев рака и более 6 млн смертей от него. У населения Российской Федерации ежегодно фиксируют до 450 тыс. новых случаев злокачественных опухолей, около 25 % которых локализовано в челюстно-лицевой области. Последнее актуализирует поиск решений многочисленных лечебно-диагностических проблем современной онкостоматологии, начиная с задач формирования высокого уровня онкологической настороженности, ранней диагностики и скрининга потенциально злокачественных заболеваний полости рта и заканчивая полноценной стоматологической ортопедической эстетико-функциональной реабилитацией пациентов с приобретенными (послеоперационными) дефектами челюстных

костей [1–4]. Медицинская стоматологическая и социальная реабилитация пациентов с дефектами верхней челюсти, особенно при наличии сообщения с полостью носа или верхнечелюстным синусом, требует применения сложных съемных протезов с опорой на сохраненные участки челюсти и имеющих obturating part для создания достаточного герметизма между полостью рта и носа (рис. 1). Как правило, в подобных случаях протез-обтуратор имеет расширенные границы и, как следствие, больший вес, что ухудшает фиксацию и стабилизацию конструкции, приводит к перегрузке оставшихся зубов [5]. В связи с этим при конструировании зубочелюстных протезов представляется обоснованным сделать акцент на применении более легких, функциональных и эстетичных конструкционных материалов с достаточными параметрами прочности. Успешное решение этой задачи на основе биомеханического моделирования – залог полноценной ортопедической стоматологической реабилитации пациента с приобретенными дефектами ЧЛО, достижения желаемого структурно-функционального и эстетического результата.



а



б

Рис. 1. Клинические случаи: а – пациентка М., 65 лет: пострезекционное ороназальное сообщение слева (вид через зеркало); б – пациентка К., 27 лет: пострезекционное ороназальное сообщение справа

В числе устойчивых трендов современного стоматологического материаловедения – разработка наноструктурированных конструкционных материалов и покрытий многофункционального назначения с улучшенными прочностными характеристиками, оптимальными параметрами биосовместимости и токсико-гигиеническими характеристиками. Особый интерес к подобным материалам возникает в ортопедической стоматологии при создании различных видов зубных протезов, что стимулирует научные разработки по созданию высокофункциональных конструкционных материалов многоцелевого назначения. Так, в последнее десятилетие особое внимание уделяется разработке оптимальных рецептур наноструктурированных керамик на основе диоксида циркония [6–8] и диоксида титана [9; 10]. Спектр функциональных возможностей применения диоксида циркония различного состава для зубного протезирования достаточно хорошо изучен, однако потенциал возможностей его применения в современной ортопедии полностью не исчерпан. Особое внимание исследователей привлекает разработка подходов технологической обработки и стабилизация диоксида циркония оксидом иттрия и церия, результатом чего является достижение оптимальной кажущейся плотности и открытой пористости спеченных образцов керамического материала [11; 12]. Оценка параметров острой токсичности и влияния на регенерацию костной ткани разработанной керамики на основе стабилизированного диоксида циркония открывает потенциальную возможность применения данного конструкционного материала в практической деятельности врача-стоматолога [13], что подтверждено биомеханическими расчетами напряженно-деформированного состояния ряда конструкций [14; 15].

Успешные фундаментальные разработки и эффективное применение в целях зубного протезирования диоксида циркония

дало толчок к исследованиям возможностей использования в ортопедической стоматологии наноструктурированных керамик на основе диоксида титана. Несмотря на то, что керамические материалы на основе диоксида циркония и диоксида титана близки по своим физико-механическим свойствам и имеют во многом сходные биомеханические характеристики, потенциал возможностей применения последнего в качестве конструкционного материала в ортопедической стоматологии до конца не раскрыт. Вне поля исследователей – целесообразность применения диоксида титана для армирования полиамидных материалов стоматологического назначения. Обращают на себя внимание данные, что введение в состав полимерного конструкционного материала наноструктурированного диоксида титана в виде дисперсионного армирования приводит к увеличению его предела прочности на 30 % [16; 17], что предопределяет перспективные направления настоящего исследования и его конкретную целевую установку.

*Цель исследования* – биомеханический анализ модели пострезекционного протеза-обтуратора на верхнюю челюсть, выполненного из термоинжекционного полиамида, дисперсионно армированного наноразмерным диоксидом титана.

#### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

По совокупности физико-механических характеристик наше внимание привлёк термоинжекционный полиамид *Vertex Thermo-Sens* (ISO-Сертификат 9001: 2008). Отсутствие остаточного мономера, минимальная усадка, высокая плотность в сочетании с небольшим удельным весом ( $1,04 \text{ г/см}^3$ ), отсутствие металлических конструкционных элементов предполагают ряд преимуществ использования данного полиамида для изготовления сложно-челюстных протезов пациентам при

наличии приобретенных дефектов челюстных костей. Кроме этого, возможность применения денто-альвеолярных кламмеров позволяет снизить нагрузку на зубы здоровой половины челюсти и облегчить вес ортопедической конструкции. Для улучшения прочностных характеристик полиамида экспериментально, на этапе термопрессования, было предложено введение в его состав наноразмерного порошка диоксида титана в качестве армирующего компонента (патент РФ на полезную модель № 172668 от 18.07.2017; патент на изобретение РФ № 2631050 от 15.09.2017). Термин «армирование» (от лат. *armo* – вооружаю, снабжаю), в соответствии с трактовкой Большого Энциклопедического Словаря, использовали для обозначения усиления материала или частей конструкции элементами (арматурой) из другого, более прочного материала. Справедливо считали, что именно этот термин подходит для объяснения сути улучшения прочностных свойств и относится к категории дисперсного армирования.

Для обеспечения доказательной базы преимущества конструкции протеза нами совместно с сотрудниками кафедры вычислительная математика, механика и биомеханика ФГАОУ ВО ПНИПУ (зав. кафедрой – д-р тех. наук, профессор В.Ю. Столбов) проведен биомеханический расчет прочности элементов протеза-обтуратора. Создание трехмерной (3D) модели твердого тела осуществлен при помощи 3D-сканера Artec Eva. Далее на основе CAD-модели проводили ее анализ с помощью специализированного программного пакета ANSYS Workbench (Ansys). Расчеты были произведены методом конечных элементов с описанными выше структурой протеза, нагрузками и свойствами. Напряжения сжатия и растяжения, сдвиговые напряжения объединяли и анализировали как одноосный составной эквивалент напряжения Мизеса. В качестве исследуемой области брали фрагмент протеза-обтуратора

и задавали границы перемещений и нагрузок. Биомеханическая модель включала в себя конструкцию протеза, разделённую на две части: зубную и нёбную. Построение имело следующие допущения: 1) материалы протеза однородны и изотропны; 2) среда сплошная, начальные напряжения отсутствуют; 3) нёбная часть протеза фиксирована; 4) к зубной части прикладывается распределенная нагрузка. Для изучения биомеханики верхнечелюстного протеза-обтуратора применяли метод математического моделирования. Построение расчетной конечно-элементной модели заключалось в выполнении следующих этапов: определение механических свойств материалов; построение геометрической модели; создание конечно-элементной сетки; задание граничных условий (условий закрепления, силовых воздействий). При проведении расчетов использована классическая постановка задачи механики упругого изотропного тела, состоящая из уравнений равновесия, геометрических соотношений Коши и закона Гука.

До проведения биомеханических расчетов осуществлено исследование механических свойств полиамидного материала на контрольных (10 шт., 2×30×10 мм) и экспериментальных (10 шт., 2×30×10 мм) образцах, армированных наноразмерным диоксидом титана в количестве до 1 мас. %. Исследовали наиболее информативные параметры: прочность на трехточечный изгиб ( $\sigma_{\max}$ , МПа) и модуль упругости ( $E$ , МПа), позволяющие учитывать вертикальные и горизонтальные силы, аналогичные силам, развиваемым зубочелюстной системой во время функции жевания. Испытания экспериментальных образцов проведены на базе Центра экспериментальной механики, кафедры механики композиционных материалов и конструкций ПНИПУ (зав. кафедрой, д. физ.-мат. наук, проф. В.Э. Вильдеман) с применением электромеханической системе *Instron 5965*. В ре-

зультате испытаний получали зависимости «сила – прогиб» и в дальнейшем был осуществлен переход к зависимостям «напряжения – деформации» с определением модуля Юнга и максимальных напряжений. Полученные данные по механическим свойствам полиамида в сравнительном аспекте анализировали с аналогичными параметрами для акриловой пластмассы, взятыми из справочной литературы [18]. По определяемым величинам проведена статистическая обработка с выделением доверительного интервала с вероятностью 95 %.

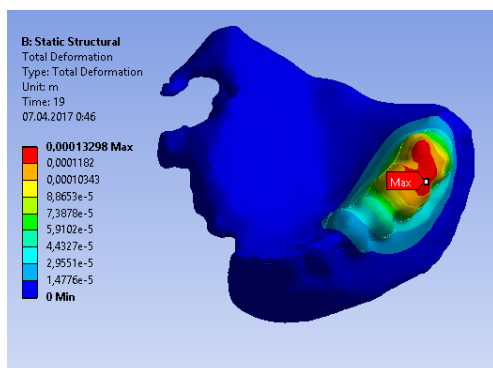
### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя полученные данные механических испытаний, было определено, что при введении в состав термоинжекционного полиамида армирующего компонента (наноразмерный диоксид титана) происходит увеличение максимальных напряжений и модуля Юнга на 8,4 и на 7,2 % соответственно, что отвечает нормативам стандарта ISO 1567: 1999 Dentistry – Denture base polymers (Стоматология. Полимеры для базисов зубных протезов).

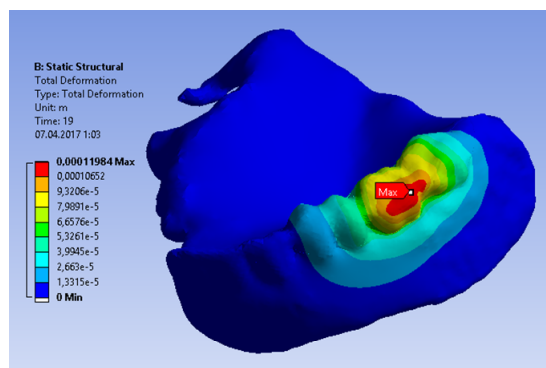
Биомеханическое моделирование спроектированной ситуации в условиях нагрузки показало, что максимальные напряжения

верхнечелюстного протеза-обтуратора располагаются на границе нёбной части протеза и искусственных зубов (рис. 2). При этом величина вертикальной нагрузки (эквивалентное значение напряжений) в модели протеза из полиамида составило 31,47 МПа, тогда как в модели из полиамида, армированного наноразмерным диоксидом титана, это значение равнялось 30,88 МПа (рис. 3, а).

Кроме этого, при горизонтальной нагрузке максимальные напряжения для биомеханической модели, выполненной из полиамида, составили 46,5 МПа, а при его армировании диоксидом титана – 45,25 МПа (рис. 3, б). Определенный практический интерес имеют следующие полученные данные: наличие оставшихся после операции резекции краевых фрагментов опорной костной ткани протезного ложа верхней челюсти позволяет снизить уровень напряжений на 1–2 % (30,55 и 44,33 МПа соответственно), достигнуть стабильности конструкции протеза с минимизацией полей перемещений до 0,37 мм. Это связано со свойствами податливости слизистой оболочки рта, которая позволяет смягчить зону контакта – протезное ложе-протез, что благоприятно сказывается на стабильности протеза.



а



б

Рис. 2. 3D-модель пострезекционного протеза на верхнюю челюсть (биомеханическое моделирование спроектированной ситуации): а – поле перемещений и максимальные значения при вертикальной нагрузке; б – поле перемещений и максимальные значения при горизонтальной нагрузке

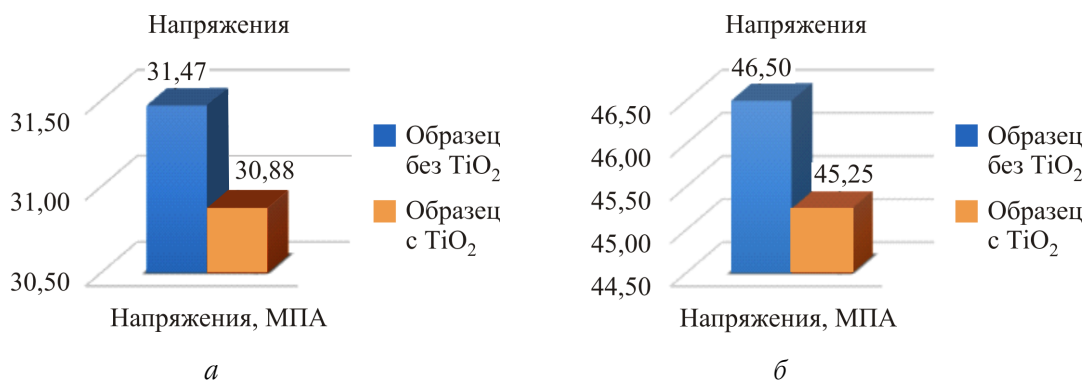


Рис. 3. Данные биомеханических расчетов вертикальных и горизонтальных нагрузок:  
 а – поле эквивалентных напряжений и максимальные значения при вертикальной нагрузке;  
 б – поле эквивалентных напряжений и максимальные значения при горизонтальной нагрузке

Следует отметить, что чрезмерное напряжение протеза-обтуратора в зоне контакта с протезным ложем является потенциальным фактором риска атрофии краевой костной ткани области резекции, а необоснованный выбор конструкционного материала протеза способен приводить к высоким напряжениям в самом протезе и разрушению его элементов. Поэтому оценка пикового уровня напряжений в конструкции протеза-обтуратора имеет важное значение. Согласно проведенным биомеханическим расчетам, уровень максимальных напряжений армированного диоксидом титана полиамида находился в пределах показателей прочности и составил 45,25 МПа. Таким образом, его деформации и напряжения соответствуют физически предполагаемому представлению напряженно-деформированного состояния пострезекционного протеза-обтуратора. Кроме этого, включение в конструкцию протеза-обтуратора опорно-удерживающих кламмеров, выполненных из этого же полиамида, приводит к распределению напряжений на поверхности зуба за счет окклюзионной нагрузки. При этом максимальные напряжения в полимере, армированным наноразмерным диоксидом титана, в зоне контакта с окклюзионной накладкой дости-

гают 35,00 МПа, а деформации, определенные в области нагрузки, равны 0,001, что свидетельствует о достаточной стабильности и хорошей фиксации пострезекционного протеза. В случае исключения окклюзионной накладки из конструкции протеза-обтуратора происходит увеличение эквивалентных напряжений до 39 МПа, т.е. нагрузка на опорный зуб увеличивается на 11 %, что со временем неизбежно приведет к его функциональной перегрузке.

## Выводы

Биомеханические расчеты модели протеза-обтуратора на верхнюю челюсть, изготовленного из термоинжекционного полиамида *Vertex ThermoSens*, армированного наноразмерным диоксидом титана, открывают новые перспективные возможности его использования в практической деятельности врача ортопеда-стоматолога. Доказаны необходимые прочностные характеристики армированного диоксидом титана полиамидного материала, соответствующие требованиям ГОСТ 31572-2012 «Материалы полимерные для базисных зубных протезов. Технические требования. Методы испытаний» и международному стандарту ISO 1567:



1999 Dentistry – Denture base polymers (Стоматология. Полимеры для базисов зубных протезов), а введение в конструкцию протеза опорно-удерживающего кламмера из этого же материала обеспечивает распределение и уменьшение возникающих напряжений в опорном зубе без нарушения фиксации и стабилизации протеза с сохранением условий его прочности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гилева О.С., Либик Т.В., Казанцева Е.В., Кодзаева Э.С. Оценка уровня онкологической настороженности в системе онкостоматологической профилактики. *Dental Forum* 2019; 4: 28–29.
2. Епифанова С.А., Поляков А.П., Ребрикова И.В., Дорохин Д.В., Шапран С.О. Послеоперационные дефекты верхней челюсти. *Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова* 2018; 13 (4): 132–136.
3. Халявина И.Н., Гилева О.С., Либик Т.В., Кошкин С.В., Куклина Е.А., Куклин Н.С. Оценка эффективности комплексной стоматологической реабилитации пациентов с отдельными формами предрака полости рта. *Эндодонтия Today* 2019; 17 (3): 13–16.
4. Шулятникова О.А. Оптимизация ортопедического этапа лечения в комплексной специализированной помощи пациентам с дефектами челюстно-лицевой области. *Российский стоматологический журнал* 2016; 2: 94–98.
5. Лечение больных с дефектами челюстных костей. Под ред. Ф.И. Кислых, Г.И. Рогожников, М.Д. Кацнельсон. М.: Медицинская книга 2006; 196.
6. Лебеденко И.Ю. Современные отечественные материалы для безметалловых зубных протезов. *Стоматология* 2017; 1 (96): 60–62.
7. Лебеденко И.Ю., Назарян Р.Г., Романкова Н.В., Максимов Г.В., Вураки Н.К. Сопоставительный анализ современных методов изготовления мостовидных зубных протезов на основе диоксида циркония. *Российский стоматологический журнал* 2015; 19 (2): 6–9.
8. Рогожников А.Г., Гилева О.С., Ханов А.М., Шулятникова О.А., Рогожников Г.И., Пьянкова Е.С. Применение цифровых технологий для изготовления диоксидциркониевых зубных протезов с учетом индивидуальных параметров зубочелюстной системы пациента. *Российский стоматологический журнал* 2015; 1: 46–51.
9. Оксиды титана, церия, циркония, иттрия, алюминия. Свойства, применение и методы получения. Под ред. З.Р. Исмагилов, В.В. Кузнецов, Л.Б. Охлопкова. Новосибирск: Изд-во СО РАН 2010; 246.
10. Porozova S.E., Gurov A.A., Kamenschi-kov O. Yu., Shuliatnikova O.A., Rogozhnikov G.I. Study of a Nanostructured Anatase Coating on the Rutile Surface. *Russian journal of non-ferrous metals* 2019; 60 (2): 194–199.
11. Порозова С.Е., Рогожников А.Г., Шокков В.О., Поздеева Т.Ю. Оптимизация условий получения нанопорошков диоксида циркония по золь-гель методу. *Новые огнеупоры* 2020; (11): 38–43.
12. Рогожников А.Г. Способ получения и физико-механические испытания отечественных керамических материалов на основе диоксида циркония из наноструктурированных порошков. *Уральский медицинский журнал* 2015; 133 (10): 113–119.
13. Рогожников А.Г. Биологические свойства модифицированных гранул диоксида циркония (по данным экспериментальных исследований). *Проблемы стоматологии* 2015; 11 (3–4): 49–56.
14. Жолудев С.Е., Ивалев Ю.Н. Эстетический и биомеханический подход к изготовлению индивидуальных штифтовых конструкций. Сборник трудов всероссийской V научно-практической конференции с международным участием. Киров 2021; 70–72.



15. Няшин Ю.И., Рогожников Г.И., Рогожников А.Г., Никитин В.Н., Асташина Н.Б. Биомеханический анализ зубных имплантатов из сплава титана и диоксида циркония. *Российский журнал биомеханики* 2012; 1 (55): 102–109.

16. Лукьянов С.И., Бандура А.В., Эварестов Р.А. Температурная зависимость модуля Юнга нанотрубок на основе диоксида титана  $\text{TiO}_2$ : молекулярно-механическое моделирование. *Физика твердого тела* 2015; 57 (12): 2391–2399.

17. Шулятникова О.А., Рогожников Г.И., Порозова С.Е., Рогожников А.Г., Леушина Е.И. Функциональные наноструктурированные материалы на основе диоксида титана для использования в ортопедической стоматологии. *Проблемы стоматологии* 2020; 16 (1): 171–177.

18. Зотов А.И., Демченко Д.Н. Базисные полимеры, применяемые в стоматологии для изготовления съёмных пластиночных протезов и аппаратов. *Молодой ученый* 2015; 13: 270–274.

## REFERENCES

1. Gileva O.S., Libik T.V., Kazanceva E.V., Kodzaeva E.S. Assessment of the level of oncological alertness in the system of oncostomatological prevention. *Dental Forum* 2019; 4: 28–29 (in Russian).

2. Epifanova S.A., Polyakov A.P., Rebrikova I.V., Dorobin D.V., SHapran S.O. Postoperative defects of the upper jaw. *Vestnik Nacional'nogo mediko-birurgical'skogo Centra im. N.I. Pirogova* 2018; 13 (4): 132–136 (in Russian).

3. Halyavina I.N., Gileva O.S., Libik T.V., Kosbkin S.V., Kuklina E.A., Kuklin N.S. Evaluation of the effectiveness of complex dental rehabilitation of patients with certain forms of oral precancerous. *Endodontiya Today* 2019; 17 (3): 13–16 (in Russian).

4. SHulyatnikova O.A. Optimization of the orthopedic stage of treatment in complex

specialized care for patients with defects of the maxillofacial region. *Rossiyskij stomatologicheskij zhurnal* 2016; 2: 94–98 (in Russian).

5. Treatment of patients with jaw bone defects. Pod red. F.I. Kislyh, G.I. Rogozhnikov, M.D. Kacnel'son. Moscow: Medicinskaya kniga 2006; 196 (in Russian).

6. Lebedenko I. YU. Modern domestic materials for metal-free dentures. *Stomatologiya* 2017; 1 (96): 60–62 (in Russian).

7. Lebedenko I. YU., Nazaryan R.G., Romankova N.V., Maksimov G.V., Vuraki N.K. Comparative analysis of modern methods of manufacturing bridge-shaped dentures based on zirconium dioxide. *Rossiyskij stomatologicheskij zhurnal* 2015; 19 (2): 6–9 (in Russian).

8. Rogozhnikov A.G., Gileva O.S., Hanov A.M., SHulyatnikova O.A., Rogozhnikov G.I., Pyankova E.S. The use of digital technologies for the manufacture of zirconium dioxide dentures, taking into account the individual parameters of the dental system of the patient. *Rossiyskij stomatologicheskij zhurnal* 2015; 1: 46–51 (in Russian).

9. Oxides of titanium, cerium, zirconium, yttrium, aluminum. Properties, application and methods of obtaining. Pod red. 3.P. Ismagilov, V.V. Kuznecov, L.B. Ohlopokova Novosibirsk: Izdvo SO RAN 2010; 246 (in Russian).

10. Porozova S.E., Gurov A.A., Kamenshikov O. Yu., Shulyatnikova O.A., Rogozhnikov G.I. Study of a Nanostructured Anatase Coating on the Rutile Surface. *Russian journal of non-ferrous metals* 2019; 60 (2): 194–199 (in Russian).

11. Porozova S.E., Rogozhnikov A.G., SHokov V.O., Pozdeeva T. YU. Optimization of conditions for obtaining zirconium dioxide nanopowders by sol-gel method. *Novye ognepupory* 2020; (11): 38–43 (in Russian).

12. Rogozhnikov A.G. Method of preparation and physico-mechanical testing of domestic ceramic materials based on zirconium dioxide from nanostructured powders. *Ural'skij medicinskij zhurnal* 2015; 133 (10): 113–119 (in Russian).

13. Rogozhnikov A.G. Biological properties of modified zirconium dioxide granules (according to experimental studies). *Problemy stomatologii* 2015; 11 (3–4): 49–56 (in Russian).

14. ZHoludev S.E., Ivlev YU.N. Aesthetic and biomechanical approach to the production of individual pin structures. *Sbornik trudov vsereossijskoj V nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Kirov 2021: 70–72 (in Russian).

15. Nyashin YU. I., Rogozhnikov G.I., Rogozhnikov A.G., Nikitin V.N., Astashina N.B. Biomechanical analysis of dental implants made of titanium and zirconium dioxide alloy. *Rossijskij zhurnal biomekhaniki* 2012; 1 (55): 102–109 (in Russian).

16. Luk'yanov S.I., Bandura A.V., Evarestov R.A. Temperature dependence of Young's modulus of titanium dioxide-based TiO<sub>2</sub> nanotubes: molecular mechanical modeling. *Fizika tverdogo tela* 2015; 57 (12): 2391–2399 (in Russian).

17. Shulyatnikova O.A., Rogozhnikov G.I., Porozova S.E., Rogozhnikov A.G., Leushina E.I. Functional nanostructured materials based on titanium dioxide for use in orthopedic dentistry. *Problemy stomatologii* 2020; 16 (1): 171–177 (in Russian).

18. Zotov A.I., Demchenko D.N. Basic polymers used in dentistry for the manufacture of removable plate prostheses and devices. *Molodoj uchenyj* 2015; 13: 270–274 (in Russian).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.

Поступила: 04.09.2023

Одобрена: 11.09.2023

Принята к публикации: 22.09.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Функциональные возможности керамических наноструктур, используемых для армирования полимерных конструкционных материалов стоматологического назначения / Г.И. Рогожников, О.А. Шулятникова, О.С. Гилева, А.Г. Рогожников, В.Н. Никитин // Пермский медицинский журнал. – 2023. – Т. 40, № 5. – С. 80–89. DOI: 10.17816/pmj40580-89

Please cite this article in English as: Rogozhnikov G.I., Shulyatnikova O.A., Gileva O.S., Rogozhnikov A.G., Nikitin V.N. Functional capabilities of ceramic nanostructures used for reinforcement of polymer structural materials for dental purposes. *Perm Medical Journal*, 2023, vol. 40, no. 5, pp. 80–89. DOI: 10.17816/pmj40580-89