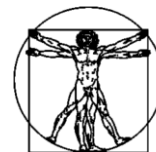


DOI: 10.15593/RZhBiomech/2019.1.08  
УДК 531/534: [57+61]



**Российский  
Журнал  
Биомеханики**  
www.biomech.ru

## **БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАПЫ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ ПОЛИАМИДА, АРМИРОВАННОГО НАНОРАЗМЕРНЫМ ДИОКСИДОМ ТИТАНА**

**В.О. Гридина<sup>1,2</sup>, Г.И. Рогожников<sup>1</sup>, Ю.В. Каракулова<sup>3</sup>,  
О.А. Шулятникова<sup>1</sup>, В.Н. Никитин<sup>4</sup>, П.Н. Килина<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Кафедра ортопедической стоматологии Пермского государственного медицинского университета имени академика Е.А. Вагнера Минздрава России, Россия, 614000, Пермь, ул. Петропавловская, 26, e-mail: lettarus@mail.ru

<sup>2</sup> Отделение стоматологии общества с ограниченной ответственностью «Клиники здоровья “Медлайф”», Россия, 614000, Пермь, ул. Петропавловская, 45

<sup>3</sup> Кафедра неврологии имени В.П. Первушина Пермского государственного медицинского университета имени академика Е.А. Вагнера Минздрава России, Россия, 614000, Пермь, ул. Петропавловская, 26, e-mail: julia.karakulova@mail.ru

<sup>4</sup> Кафедра вычислительной математики, механики и биомеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: nikitinvladislav86@gmail.com

<sup>5</sup> Кафедра материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: detali@pstu.ru

**Аннотация.** Приведены результаты биомеханического моделирования конструкции капы из полиамида, армированного наноструктурированным диоксидом титана (5 и 10 мас. %), применяемой для лечения повышенной стираемости твердых тканей зубов у пациентов с бруксизмом. Потеря твердых тканей зубов приводит к изменению состояния прикуса с развитием миофункциональных и эстетических нарушений челюстно-лицевой области, что требует выбора упрочненного эстетичного конструкционного материала для изготовления капы. В литературных данных подчеркивается увеличение прочностных свойств полиамидного материала при введении в его состав наноструктурированного диоксида титана. Модуль упругости полиамида практически линейно увеличивается по отношению к введенному в его состав количеству диоксида титана от 0 до 5 мас. %. При большем увеличении количества введенного диоксида титана (10 мас. %) дальнейшего роста величины модуля упругости не происходит. Данный факт авторы связывают с необходимостью усовершенствования методики равномерного введения наноразмерного порошка диоксида титана в полиамидный материал. Наличие неравномерного распределения диоксида титана (10 мас. %) в виде гранул приводило к неоднородности материала и появлению концентраторов напряжений, повлиявших на снижение величины предела прочности и модуля

---

© Гридина В.О., Рогожников Г.И., Каракулова Ю.В., Шулятникова О.А., Никитин В.Н., Килина П.Н., 2019

Гридина Виолетта Олеговна, ассистент кафедры ортопедической стоматологии, стоматолог-ортопед отделения стоматологии, Пермь

Рогожников Геннадий Иванович, д.м.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры ортопедической стоматологии, Пермь

Каракулова Юлия Владимировна, д.м.н., профессор, заведующая кафедрой неврологии им. В.П. Первушина, Пермь

Шулятникова Оксана Александровна, д.м.н., доцент кафедры ортопедической стоматологии, Пермь

Никитин Владислав Николаевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, Пермь

Килина Полина Николаевна, старший преподаватель кафедры материалов, технологий и конструирования машин, Пермь

упругости. Тем не менее полученные данные о напряжениях полиамида, армированного наноразмерным диоксидом титана (5 и 10 мас. %), свидетельствуют о целесообразности его применения при изготовлении конструкции капы для лечения последствий бруксизма в случаях, когда необходимо выдерживать повышенные нагрузки, возникающие в процессе патологического сжатия челюстей.

**Ключевые слова:** ортопедическая стоматология, биомеханическое моделирование, капа, наноразмерный диоксид титана, бруксизм.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема лечения больных с функциональными нарушениями жевательных мышц челюстно-лицевой области не теряет своей актуальности. Данный факт связан с возникающими миофункциональными нарушениями зубочелюстной системы, которые с течением времени приводят не только к болевым ощущениям мышечного аппарата челюстно-лицевой области, но и к эстетическим нарушениям, связанным с изменением прикуса, и требуют дальнейшей стоматологической ортопедической реабилитации пациентов [8, 9].

Среди данной категории пациентов особый интерес представляют те лица, проблемы которых связаны с миофункциональными нарушениями и последующими осложнениями в виде поломок и сколов изготовленных ортопедических конструкций [1, 3–7].

На сегодняшний день 95% съёмных ортопедических конструкций выполнены из акриловой пластмассы, имеющей недостатки в виде наличия остаточного мономера и дезинтеграции ее структуры в процессе эксплуатации, усадки при изготовлении конструкций и малых прочностных характеристик [7]. Кроме этого, акриловые пластмассы в большинстве случаев требуют наличия в своей конструкции малоэстетичных фиксирующих металлических элементов. Именно данные недостатки акриловых полимеров обуславливают поиск базисных материалов неакриловой природы с улучшенными физико-механическими характеристиками и выгодными эстетическими параметрами.

В связи с этим на современном этапе развития стоматологического материаловедения особый интерес представляют базисные полимеры поликарбонатной, полиамидной, полистироловой и полиуретановой природы, имеющие ряд преимуществ при изготовлении ортопедических конструкций в сравнении с материалами акриловой природы [8, 9]. Особый интерес и внимание авторов привлек термопластичный полиамид *Vertex ThermoSens*, рекомендованный для изготовления базисов съёмных конструкций. Отсутствие остаточного мономера и возможность проведения лабораторной коррекции протезов; минимальная усадка (до 1%) в процессе термопрессования конструкций (для акриловых пластмасс – 8%); высокая плотность в сочетании с малым удельным весом (1,04 г/см<sup>3</sup>), в то время как у сплавов металла удельный вес составляет от 7 г/см<sup>3</sup> и более, а у акриловых пластмасс – 1,20 г/см<sup>3</sup>; отсутствие металлических конструкционных элементов определяют ряд преимуществ при изготовлении конструкций протезов для пациентов с различными клиническими ситуациями [8, 9].

Результаты ранее проведенных биомеханических исследований конструкций из полиамида *Vertex ThermoSens* показали возможность снижения нагрузки на зубы у пациентов с приобретенными дефектами верхней челюсти в случае применения дентоальвеолярных кламмеров. Кроме этого, применение данного полиамида позволяет изготавливать точные, облегченные, эстетичные, комфортные в использовании конструкции с минимальной пористостью, сводящей к минимуму возможность

фиксации микробной пленки на конструкционном материале [8, 9]. Этими же авторами проведены физико-механические исследования полимерного материала в случае введения в его состав наноразмерного диоксида титана, которые свидетельствует об увеличении его предела прочности при растяжении на 30%.

В связи с этим для улучшения прочностных характеристик модифицированного конструкционного материала при изготовлении кап, испытывающих повышенные нагрузки в условиях миофункциональной перегрузки, на этапе термопрессования выполнено армирование базисного полиамидного материала путем введения в его состав наноразмерного порошка диоксида титана в количестве 5 и 10 мас. %, а также производился сравнительный анализ с результатами ранее проведенных работ [8, 9], в которых наноструктурированный порошок диоксида титана вводился в объемные протезы-обтураторы до 1 мас. % (патент № 2631050 от 15.09.2017 г.).

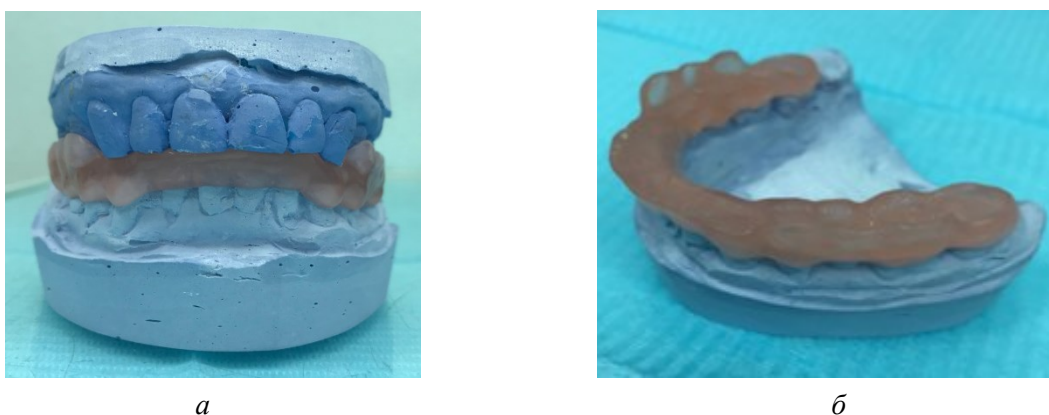


Рис. 1. Капа на гипсовой модели: *а* – между челюстями; *б* – на нижней челюсти

Таким образом, целью данной работы является биомеханический анализ напряженно-деформированного состояния капы на нижнюю челюсть, выполненной из полиамидного конструкционного материала (рис. 1), армированного наноразмерным диоксидом титана 1; 5 и 10 мас. %.

### БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА

Биомеханическая модель нижней челюсти и зубов построена при следующих допущениях:

- 1) свойства нижней челюсти и зубов однородны и изотропны (табл. 1);
- 2) среда сплошная, начальные напряжения отсутствуют;
- 3) капа жестко закреплена на зубной ряд нижней челюсти (известна граница контакта и рассматривается как тело с разными свойствами);
- 4) к зубной части приложена распределенная нагрузка, соответствующая максимальной силе сжатия челюстей (500 Н).

Свойства материала капы описаны ниже в разделе «Результаты механических экспериментов».

В данной работе решена задача выбора количества введения наноразмерного порошка диоксида титана в полиамид (1; 5 и 10 мас. %), влияющего на прочность материала капы при условии заданной геометрии.

В качестве исследуемой области берется фрагмент нижней челюсти с зубным рядом и наложенной на зубы капой (рис. 2, *а*).

Таблица 1

**Механические свойства зубов, костной ткани нижней челюсти и капы**

Параметр	Материал	
	Зубы	Костная ткань нижней челюсти
Модуль Юнга $E$ , МПа	$1,8 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,3	0,3
Предел прочности $\sigma_{пр}$ , МПа	11,5	100

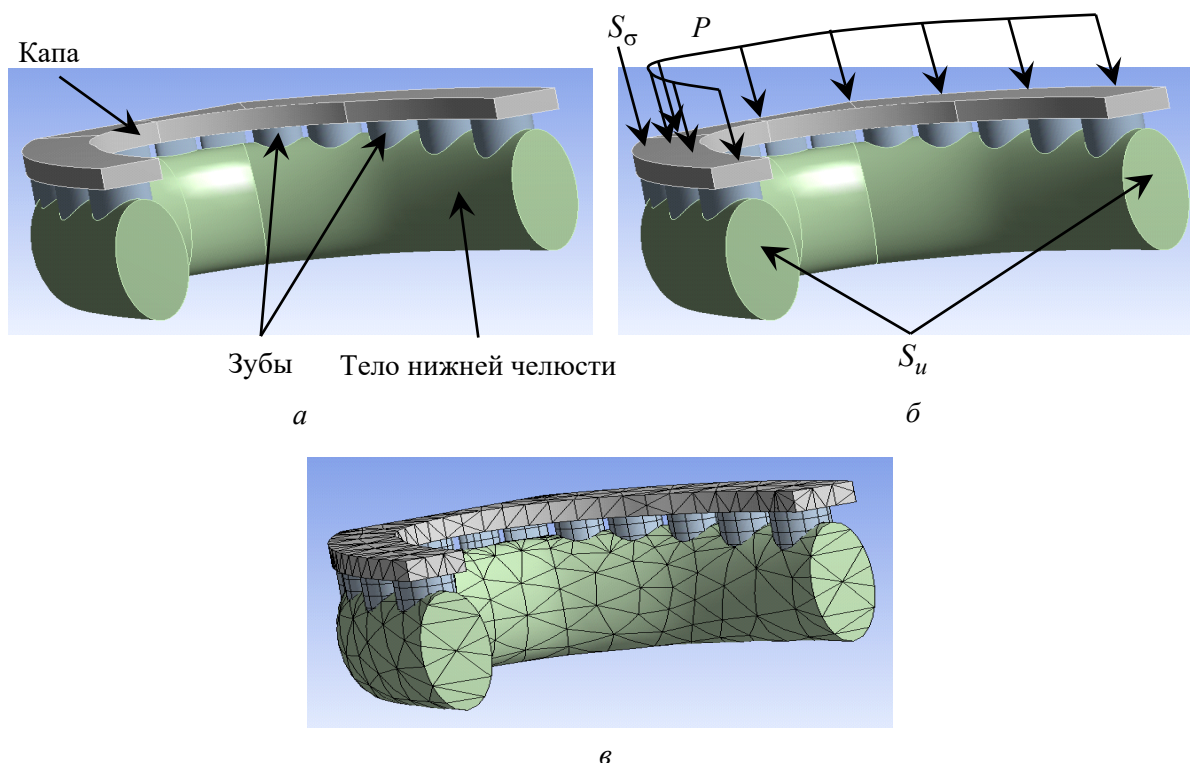


Рис. 2. Исследуемая область: *a* – основные элементы; *б* – граничные условия; *в* – конечно-элементная модель

На границах области задаются условия на перемещения и нагрузки (см. рис. 2, б).

Использована классическая постановка задачи механики упругого изотропного тела, состоящая из уравнений равновесия, геометрических соотношений Коши и закона Гука:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0, \mathbf{r} \in V; \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}^T), \mathbf{r} \in \bar{V}; \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{r} \in \bar{V}; \tag{3}$$

где  $V$  – область пространства, занятая телом,  $\bar{V} = V \cup S$ ,  $S$  – граница тела;  $\boldsymbol{\sigma}$  – симметричный тензор напряжений;  $\mathbf{r}$  – радиус-вектор точки;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – тензор малой деформации;  $\mathbf{u}$  – вектор перемещений;  $\mathbf{C}$  – тензор четвертого ранга упругих модулей.

Граничные условия являются следующими:

1) граница  $S_\sigma$  подвержена равномерному жевательному давлению, действующему перпендикулярно верхней поверхности капы (см. рис. 2, б).

$$\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{p}, \mathbf{r} \in S_\sigma, \tag{4}$$

2) граница  $S_u$  жестко закреплена (см. рис. 2, б).

$$\mathbf{u} = \mathbf{0}, \mathbf{r} \in S_u. \quad (5)$$

Исследуемая область (основание тела нижней челюсти + зубы, погруженные в него, + капа) после разбиения на конечные элементы содержала 22 340 узлов (7446 элементов) (см. рис. 2, в).

### РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для определения механических свойств материала капы из полиамидного материала *Vertex Thermo Sens* с добавлением наноразмерного диоксида титана (5 и 10 мас. %) проведены испытания на трехточечный изгиб в электромеханической системе *Instron 5965* с максимальным развиваемым усилием 5 кН (табл. 2).

Таблица 2

#### Механические свойства полиамида, армированного наноструктурированным диоксидом титана

Параметр	Полиамид, армированный наноструктурированным диоксидом титана			
	0 мас. %	1 мас. %	5 мас. %	10 мас. %
Модуль Юнга $E$ , МПа	1035 ± 37	1110 ± 23	1642 ± 64	1647 ± 113
Предел прочности $\sigma_{пр}$ , МПа	95 ± 2	103 ± 2	80,5 ± 5	82 ± 8

Основой для методики испытания послужил стандарт ГОСТ 31572–2012 «Материалы полимерные для базисных зубных протезов. Технические требования. Методы испытаний». Скорость нагружения составляла 5 мм/мин. Нагружение осуществлялось до достижения перемещением значения 4 мм, после чего испытание останавливалось, образец разгружался и вынимался из приспособления.

В результате механических испытаний были получены зависимости сила – прогиб и осуществлен переход к зависимостям напряжения – деформация. Далее производилось определение модуля Юнга и максимальных напряжений, соответствующих пределам пропорциональности и прочности, т.е. напряжениям, соответствующим верхней границе упругой работы материала капы.

На рис. 2 приведены результаты анализа проведенных испытаний образцов полосок из полимерного материала *Vertex Thermo Sens* с добавлением наноразмерного диоксида титана (5 мас. %) и данные ранее проведенных исследований [8]. Можно, в первом приближении, сделать вывод о том, что при увеличении доли добавляемого диоксида титана модуль упругости линейно увеличивается, затем практически не изменяется. Сравнивая с величинами предела прочности, указанными в ранее проведенных исследованиях, можно сделать вывод, что на величину предела прочности очень значительное влияние оказывает однородность распределения диоксида титана в полиамиде, который, видимо, распределился в виде гранул, что стало местом неоднородности и появления концентраторов напряжений, повлиявших на снижение величины предела прочности. Таким образом, можно сделать вывод, что необходимым условием реального применения капы, изготовленной из полиамида, армированного наноразмерным диоксидом титана, является одновременная оценка однородности распределения диоксида титана и предела прочности при механических испытаниях.

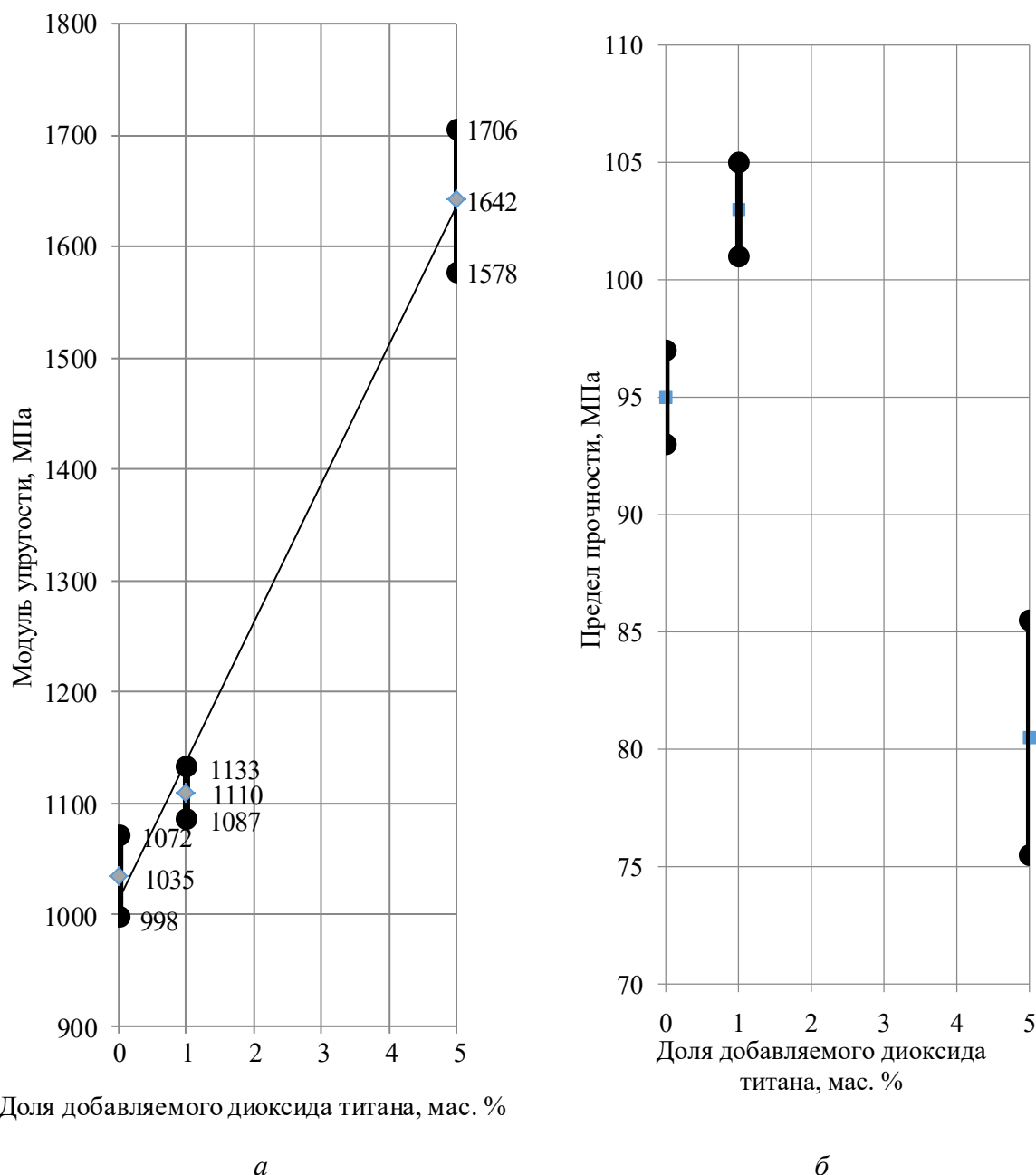


Рис. 3. Зависимость модуля упругости (а) и предела прочности (б) от доли (мас. %) добавляемого диоксида титана

### РЕЗУЛЬТАТЫ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для сравнения полученных результатов с ранее проведенными исследованиями, в которых осуществлялось введение наноразмерного порошка диоксида титана в объемные протезы-обтураторы до 1 мас. % (патент № 2631050 от 15.09.2017 г.), производился биомеханический анализ напряженно-деформированного состояния капы на нижнюю челюсть, выполненной из полиамидного конструкционного материала, армированного наноразмерным диоксидом титана не только 5 и 10 мас. %, но и 0 и 1 мас. %, где свойства были взяты из работ Шулятниковой и соавт. (2016) (см. табл. 2) [9].

Биомеханические расчеты параметров модели капы на нижнюю челюсть, изготовленной из термопластичного материала *Vertex ThermoSens*, с введенным наноразмерным диоксидом титана 5 и 10 мас. % показали прочностные характеристики, 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). Расчеты были проведены методом конечных элементов с описанными выше структурой протеза, нагрузками и свойствами. Напряжения сжатия и растяжения, сдвиговые напряжения объединялись и анализировались с использованием напряжений по Мизесу (рис. 4).

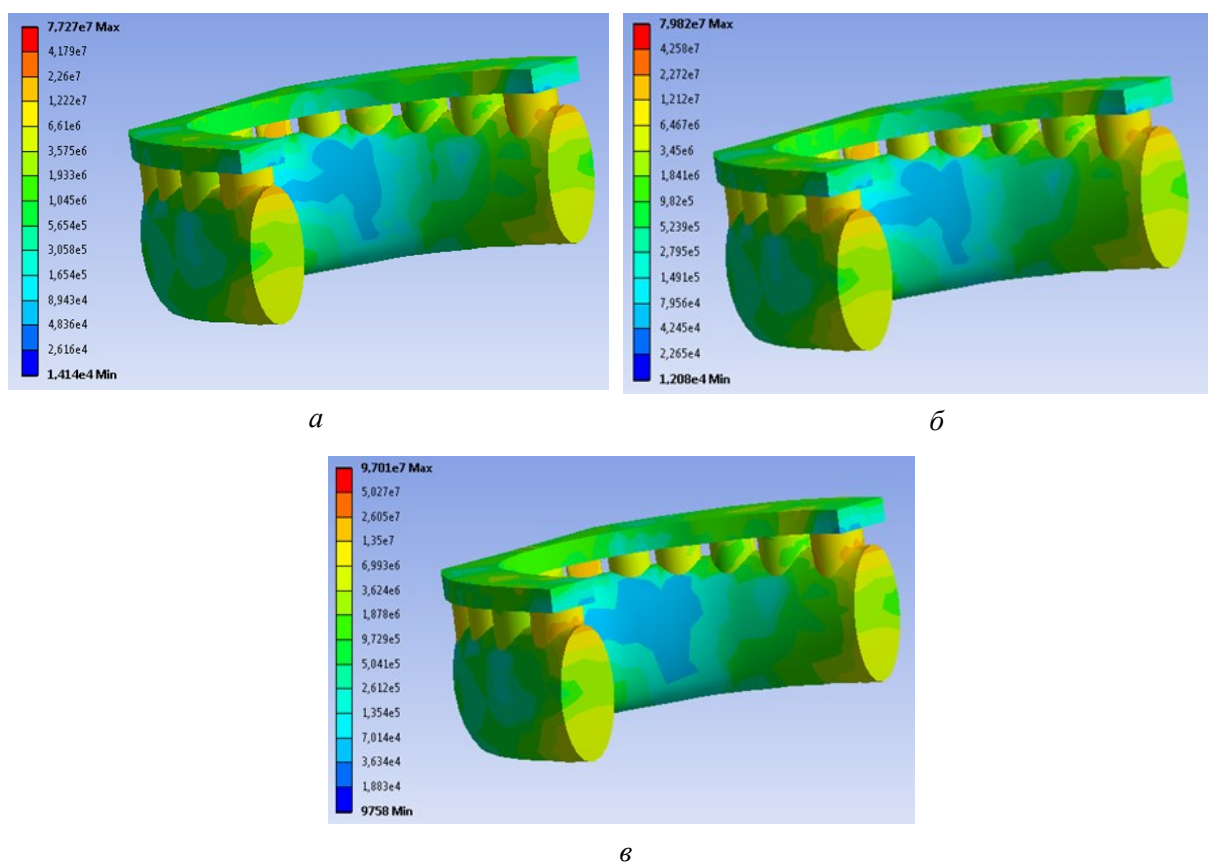


Рис. 4. Распределение напряжений по Мизесу для полиамидного конструкционного материала, армированного наноразмерным диоксидом титана: а – 0 мас. %; б – 1 мас. %; в – 5 и 10 мас. %

Проанализировав полученные распределения напряжений по Мизесу, приведенные на рис. 4, можно сказать следующее:

- 1) величины напряжений для всех трех случаев не превышают 7 МПа;
- 2) для всех трех случаев полученные максимальные значения напряжений не превышают предельных значений (табл. 2);
- 3) распределения напряжений по Мизесу для случаев, когда материал капы армирован 5 и 10 мас. % наноразмерным диоксидом титана, практически идентичны, поэтому они объединены на рис. 4, в.

## Выводы

1. Гипоаллергенность, малый удельный вес, достаточная прочность, отсутствие остаточного мономера и металлических конструктивных элементов протеза позволяют рекомендовать данный материал для изготовления кап, сложночелюстных протезов и аппаратов.

2. Проведенные биомеханические расчеты капы на нижнюю челюсть из термопластичного материала *Vertex Thermo Sens* с введенным наноструктурированным диоксидом титана 5 и 10 мас. % показали возможность его применения в случае повышенных нагрузках на зубной ряд при бруксизме.

3. Проведенные механические испытания по определению модуля упругости в зависимости от доли введенного наноструктурированного диоксида титана показали практически линейную зависимость модуля упругости (до 5 мас. %). Величины максимальных напряжений, соответствующих пределу прочности, не имели явно выраженной зависимости, видимо, ввиду недостаточной однородности введения диоксида титана, который, возможно, распределился в виде гранул, что стало местом появления концентраторов напряжений, повлиявших на снижение величины предела прочности (в большей доле для случаев 5 и 10 мас. %), а также, возможно, оказали влияние на то, что модуль упругости практически не вырос для случая 10 мас. % введенного диоксида титана по сравнению со случаем 5 мас. %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зотов А.И., Демченко Д.Н. Базисные полимеры, применяемые в стоматологии для изготовления съёмных пластиночных протезов и аппаратов // Молодой ученый. – 2015. – №13. – С. 270–274.
2. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учеб. пособие / В.Э. Вильдеман [и др.]; под ред. В.Э. Вильдемана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 165 с.
3. Николенко С.А., Ильенко И.В., Зубарев А.И., Шарипов Л.А., Мушвек А., Лобауэр У. Исследование прочности стоматологической керамики при циклической усталостной нагрузке // Клиническая стоматология. – 2015. – № 1. – С. 10–14.
4. Рогожников А.Г. Способ получения и физико-механические испытания отечественных керамических материалов на основе диоксида циркония из наноструктурированных порошков. Экспериментальное исследование // Уральский медицинский журнал. – 2015. – № 10. – С. 113–119.
5. Рогожников А.Г., Биккулова А.В., Темерова М.С. Вопросы изучения свойств материалов, применяемых в ортопедической стоматологии [Электронный ресурс] // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: электрон. текст. данные. – 2015. – С. 3220–3222. – 1 электрон. опт. диск. – Загл. с титул. экрана.
6. Руководство по стоматологическому материаловедению / под ред. Э.С. Каливарджиян, Е.А. Брагина – М.: Мед. информ. агентство, 2013. – 304 с.
7. Сирота В.В., Иванисенко В.В., Красильников В.В., Савотченко С.Е., Лукьянова О.А. Свойства наноструктурной керамики на примере анализа микроструктуры порошков диоксида циркония и механических характеристик нитрида кремния // Вестник Новгородского государственного университета. – 2013. – Т. 2, № 73. – С. 113–116.
8. Шулятникова О.А., Рогожников Г.И., Леонова Л.Е., Лохов В.А., Шулятьев А.Ф., Мозговая Л.А. Биомеханический анализ кламмерной системы фиксации протеза-обтуратора // Российский журнал биомеханики. – 2017. – Т. 21, № 3. – С. 232–238.
9. Шулятникова О.А., Рогожников Г.И., Лохов В.А., Шулятьев А.Ф. Биомеханический анализ пострезекционного протеза-обтуратора, изготовленного из полиамида, армированного наноструктурированным диоксидом титана // Российский журнал биомеханики. – 2016. – Т. 20, № 4. – С. 326–332.



## BIOMECHANICAL ANALYSIS OF A MOUTHGUARD MANUFACTURED FROM POLYAMIDE REINFORCED BY NANOSTRUCTURED TITANIUM DIOXIDE

V.O. Gridina, G.I. Rogozhnikov, Yu.V. Karakulova, O.A. Shuliatnikova,  
V.N. Nikitin, P.N. Kilina (Perm, Russia)

The results of biomechanical modelling of a mouthguard from polyamide reinforced by nanostructured titanium dioxide (5 and 10 wt. %) used in the treatment of the effects of bruxism associated with myofunctional maxillofacial area resulting in not only pain in muscles, and also aesthetic and functional disorders due to the change of the occlusion are presented. The literature data emphasize an increase in the strength properties of a mouthguard material in cases of injection of titanium dioxide nanotubes into this material. The modulus of elasticity almost linearly increases from the value of the modulus of elasticity of mouthguard polymer material relative to the amount of injected titanium dioxide (from 0 to 5 wt. %). At a further increase in the proportion of titanium dioxide introduced (10 wt. %), the modulus of elasticity is not increased further. The authors associate this with an unsatisfied method of homogeneous introduction of titanium dioxide, which apparently was distributed as granules, which became the place of heterogeneity and the appearance of stress concentrators, which affected the decrease in tensile strength (more for 5 and 10 wt. %) and the modulus of elasticity (in a larger proportion for the case of 10 wt. %). The obtained data on the stresses in amouthguardof polyamide reinforced by nanostructured titanium dioxide (5 and 10 wt. %) indicate that they withstand the stresses imposed on it during the compression of the jaws, which makes it possible to use it in treating the effects of bruxism.

**Key words:** prosthetic dentistry, biomechanical modelling, mouthguard, nanostructured titanium dioxide, bruxism.

*Получено 16 ноября 2018*