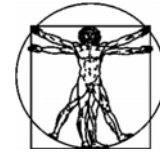


DOI: 10.15593/RZhBiomech/2017.2.08
УДК 531/534: [57+61]



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

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАГРУЖЕНИЙ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ В ЭМАЛИ ЗУБОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СПОРТИВНЫХ ЗУБНЫХ ШИН

**В.А. Лохов¹, Н.Б. Асташина^{2,4}, Е.С. Сергеева², А.Ф. Мерзляков³,
А.А. Байдаров^{5,6}**

¹ Кафедра теоретической механики и биомеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: valeriy.lokhov@yandex.ru

² Кафедра ортопедической стоматологии Пермского государственного медицинского университета им. академика Е.А. Вагнера, Россия, 614990, Пермь, ул. Петропавловская, 26, e-mail: ekaterina50590@mail.ru, astashina.nb@gmail.com

³ Кафедра механики сплошных сред и вычислительных технологий Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614000, Пермь, ул. Букирева, 15

⁴ Научный центр порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614013, Пермь, Политехнический проезд, 6

⁵ Кафедра автоматизации и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29, e-mail: baydarov.aa@psma.ru

⁶ Кафедра медицинской информатики и управления в медицинских системах Пермского государственного медицинского университета им. академика Е.А. Вагнера, Россия, 614990, Пермь, ул. Петропавловская, 26

Аннотация. Целью исследования является численный анализ распределения функциональных нагрузений, развивающихся в эмали зубов, с учетом использования различных типов персонализированных спортивных зубных шин. В ходе эксперимента проведен сравнительный биомеханический анализ, определяющий уровень функциональных нагрузений в эмали зубов, без использования защитных конструкций и при применении традиционной спортивной зубной шины, выполненной из этиленвинилацетата, а также новой конструкции с введенным дополнительно амортизирующим силиконовым слоем. Анализ результатов напряженно-деформированного состояния в построенной конечно-элементной модели с граничными условиями с помощью программы ANSYS показал, что при использовании конструкции спортивной зубной шины из этиленвинилацетата интенсивность напряжений на поверхности эмали зуба при действии максимальной нагрузки силой 400 Н составляет 97 МПа, а с предложенной спортивной зубной шиной с силиконовым слоем – 82 МПа. Таким образом, уровень функциональных напряжений в эмали зубов снижается на 15 % при использовании зубной шины с силиконовым слоем в сравнении с защитной конструкцией без дополнительных слоев.

Ключевые слова: спортивная зубная шина, этиленвинилацетат, винилполисилоксан, модуль Юнга, биомеханическое моделирование, математический анализ.

© Лохов В.А., Асташина Н.Б., Сергеева Е.С., Мерзляков А.Ф., Байдаров А.А., 2017

Лохов Валерий Александрович, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой теоретической механики и биомеханики, Пермь

Асташина Наталия Борисовна, д.м.н., профессор кафедры ортопедической стоматологии, Пермь

Сергеева Екатерина Сергеевна, к.м.н., аспирант кафедры ортопедической стоматологии, Пермь

Мерзляков Андрей Федорович, заведующий лабораторией кафедры механики сплошных сред и вычислительных технологий, Пермь

Байдаров Андрей Александрович, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и телемеханики, заведующий кафедрой медицинской информатики и управления в медицинских системах, Пермь

ВВЕДЕНИЕ

Результаты многочисленных исследований отечественных и зарубежных ученых свидетельствуют о необходимости повышения роли профилактики основных стоматологических заболеваний у спортсменов путём разработки рационального комплекса мер, направленных на повышение качества жизни и уровня стоматологического здоровья у данной категории лиц [2, 3, 6, 9, 12, 14, 15]. В последнее время в биомеханике зубочелюстной системы нашел применение ряд конструкций из материалов с памятью формы [7, 8, 10, 11, 16]. Также известен целый ряд оригинальных конструкций спортивных зубных шин, однако большинство из них имеет ряд недостатков: отсутствие специальных элементов, стабилизирующих положение нижней челюсти, и амортизирующего компонента, нейтрализующего повышенную нагрузку; достаточно большие размеры, что может нарушать дикцию, вызывать диспноэ, рвотный рефлекс, способствовать возникновению барьера коммуникации и делает их невостребованными спортсменами бесконтактных видов спорта.

Анализ специальной литературы свидетельствует, что в настоящее время существует необходимость разработки персонализированных конструкций спортивных капп, предназначенных для профилактики и устранения патологических состояний, развивающихся в структурах зубочелюстной системы и краниомандибулярного комплекса, для спортсменов разной степени тренированности, занимающихся силовыми бесконтактными видами спорта [1, 12, 13].

Новизна предложенной конструкции спортивной зубной шины заключается в дополнительном введении специального силиконового материала в конструкцию шины, выполненной из этиленвинилацетата (основного конструкционного материала, предназначенного для изготовления различных типов назубных шин) (рис. 1). Для последующего моделирования биомеханического поведения конструкции были исследованы свойства основных конструкционных материалов: этиленвинилацетата (*Drufosoft*, фирма *Dreve*, Германия) и винилполисилоксана (*UfiGelP*, фирма *Voco*, Германия). В ходе экспериментальных исследований определено, что модуль Юнга этиленвинилацетата составил в среднем $17,1 \pm 1,58$ МПа; показано, что материал демонстрирует упругопластическое поведение. Также было исследовано влияние скоростей нагружения (5, 10 и 500 мм/мин) на вид деформационных диаграмм. Модуль Юнга винилполисилоксана составил $0,34 \pm 0,1$ МПа, при этом было показано, что исследуемый материал демонстрирует абсолютно упругое поведение. Полученные результаты позволили перейти к проведению биомеханического моделирования и изучить механизмы распределения функциональных нагрузений, формирующихся в области зубного ряда при использовании зубной шины.



Рис. 1. Конструкция спортивной шины: 1 – отпечатки бугров зубов–антагонистов; 2 – перемычка в виде дуги; 3 – мягкий слой из силиконового материала; 4 – базис шины

Рис. 2. Граничные условия и конечно-элементная сетка расчётной модели

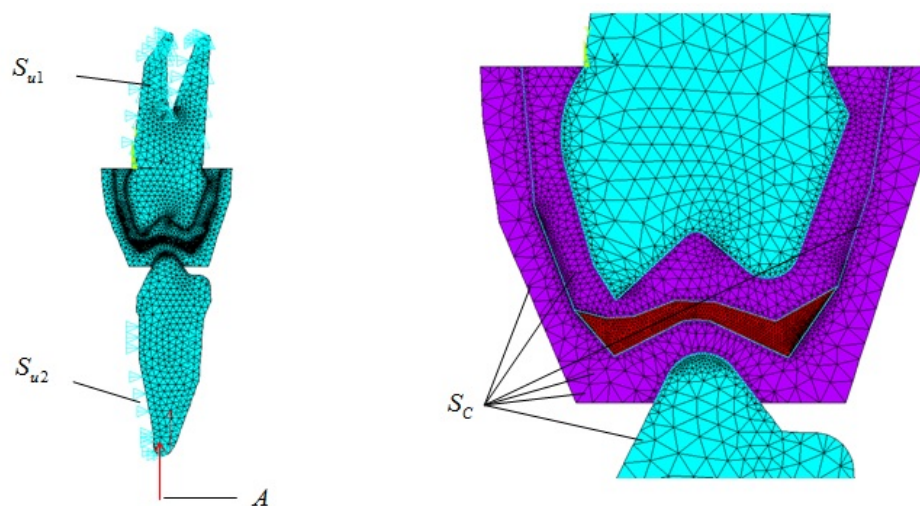


Таблица 1

Механические свойства материалов [13]

Тип материала	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона, ν
Эмаль зуба	$80,4 \cdot 10^3$	0,3
Этиленвинилацетат	17,1	0,3

Силикон <i>UfiGel P</i>	0,3	0,49
-------------------------	-----	------

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Была построена плоская геометрическая модель зуба и части спортивной зубной шины, прилегающей к зубу, в программном пакете *ANSYS* (рис. 2). Для моделирования формы зубов были использованы общепринятые анатомические данные о форме коронок правых верхних и нижних премоляров. Данная геометрическая модель состояла из пяти тел, находящихся в контакте друг с другом, и представляла собой верхний и нижний премоляры, между которыми располагались три слоя спортивной шины. Предполагалось, что слои шины могли смещаться относительно друг друга вдоль границы контакта, при этом не расходиться и не создавать пустоты между слоями. Кроме того, на упрощённых вариантах данной модели было проведено несколько серий расчетов полей напряжений: 1 – расчёт при контакте зубов без спортивной зубной шины; 2 – расчёт с конструкцией шины из этиленвинилацетата; 3 – расчёт со спортивной шиной из этиленвинилацетата с мягким силиконовым слоем.

Во всех задачах использована постановка контактной задачи механики упругого изотропного тела с условием неразрывности контакта между слоями спортивной зубной шины, состоящая из уравнений равновесия, геометрических соотношений Коши, закона Гука, граничных и контактных условий. В задаче материалы считались изотропными, тогда в тензор упругости C входили две независимые величины: модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν . Данные величины представлены в табл. 1. Контактная задача решалась по алгоритму метода штрафных функций (*Penalty method*). Коэффициент трения считался равным 0,4.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа результатов расчета напряжённо-деформированного состояния в построенной модели выбрано распределение интенсивности напряжений по Мизесу, поскольку данный показатель является наиболее наглядным для визуализации вклада главных напряжений в конструкции.

Во время занятий спортом при выполнении силовых упражнений происходит рефлекторное сжатие челюстей, в этот момент на ткани зуба действует сосредоточенная нагрузка, вызывающая напряжения, величина которых соизмерима с пределом прочности. Известно, что в точке приложения нагрузки к зубу наибольшие напряжения возникают в его поверхностном слое – в эмали, локализуясь в области вершины бугорков они могут достигать значения 800 МПа [5]. Следовательно, основную нагрузку принимает на себя наиболее твёрдая поверхностная часть зуба – эмаль, в которой действуют максимальные напряжения, а значит она в наибольшей степени подвержена разрушению. Поэтому для расчёта эффективности предложенной конструкции спортивной зубной шины авторы посчитали целесообразным рассчитать напряжения в эмали антагонизирующих зубов. Следует отметить, что зуб представляет собой композиционную конструкцию, состоящую из слоёв различных материалов, пределы прочности которых лежат в различных диапазонах (предел прочности эмали изменяется от 800 МПа до 1200 МПа; предел прочности дентина изменяется от 50 МПа до 200 МПа [5]).

Исследование распределений функциональных нагрузений, приложенных к изучаемому объекту геометрической модели, рассматривалось при действии нагрузки с силой 400 Н. При расчётах определялся уровень распределения нагрузки при максимальной (400 Н) силе сжатия зубов–антагонистов. Ограничение в 400 Н связано с формированием болевого порога при чрезмерном сжатии зубов [4].

На рис. 3 показано распределение интенсивности напряжений по Мизесу в эмали при контакте зубов–антагонистов без спортивной зубной шины при сжатии. В точке контакта данный показатель достигает максимального значения и равен 322 МПа при нагрузке 400 Н. Все напряжения, вызванные жевательной силой, концентрируются в узкой области контакта.

На рис. 4 показано распределение интенсивности напряжений по Мизесу в эмали зубов при нагрузке силой 400 Н с использованием традиционно применяемой спортивной шины из этиленвинилацетата без силиконового слоя. На вершине бугров зубов–антагонистов интенсивность напряжений достигает значения 97 МПа, при этом напряжения на поверхности эмали распределяются достаточно равномерно. Таким образом, при нагрузке силой 400 Н при наличии защитной конструкции из этиленвинилацетата напряжения на поверхности эмали зубов–антагонистов уменьшились в 3 раза по сравнению с уровнем нагрузений, формирующимся без конструкции. Следовательно, применение традиционной конструкции спортивной зубной шины из этиленвинилацетата приводит к трехкратному снижению уровня функциональных нагрузений, формирующихся в поверхностных слоях зуба.

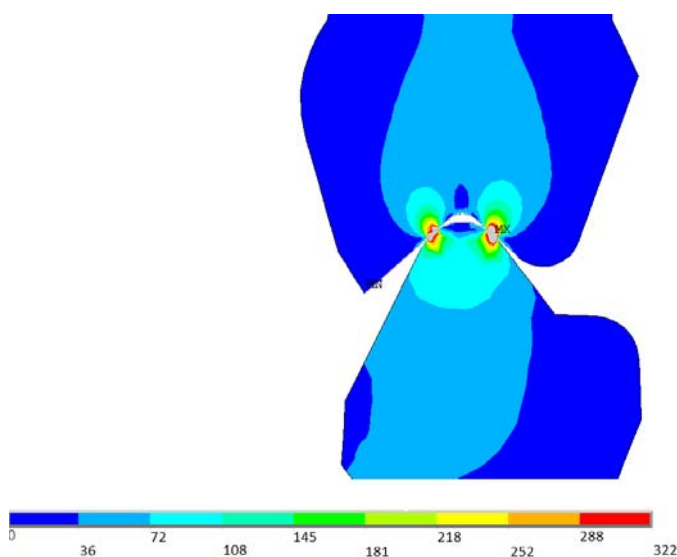


Рис. 3. Интенсивность напряжений (МПа) в эмали зубов без спортивной шины при нагрузке 400 Н. Максимальная интенсивность напряжений достигает значения 322 МПа

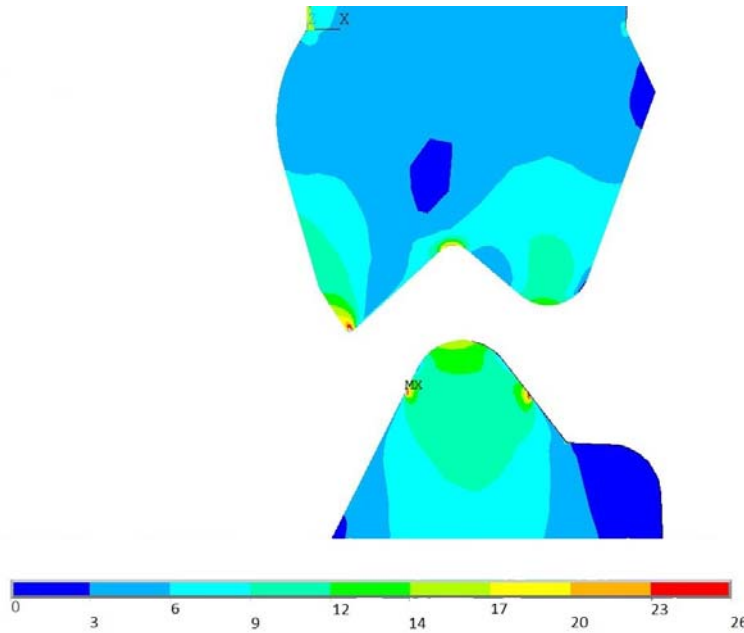


Рис. 4. Интенсивность напряжений по Мизесу (МПа) при использовании спортивной шины без силиконового слоя в эмали зубов

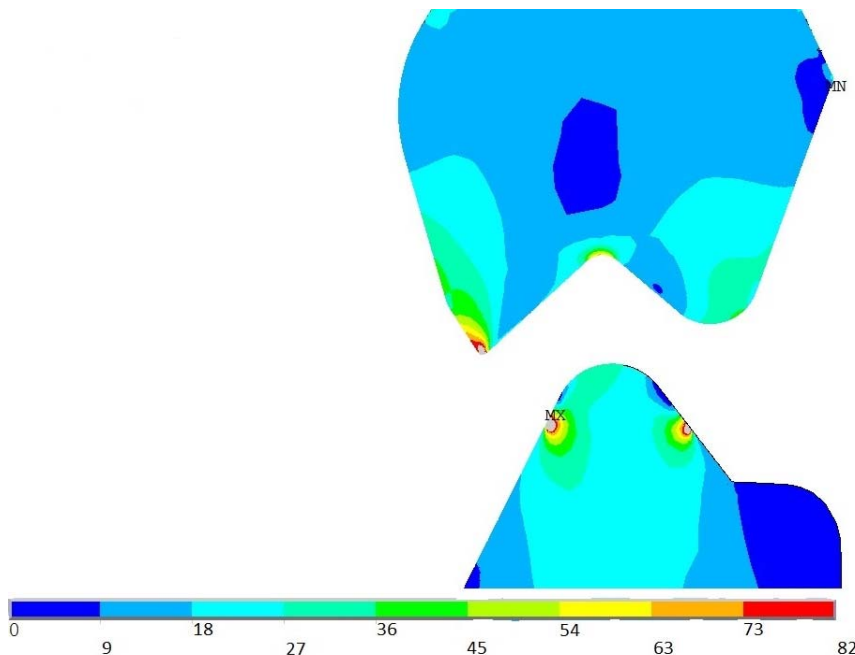


Рис. 5. Интенсивность напряжений по Мизесу (МПа) при нагрузке 400 Н с использованием спортивной шины с силиконовым слоем в эмали зубов

На рис. 5 показано распределение интенсивности напряжений по Мизесу в эмали зубов при нагрузке 400 Н с использованием спортивной шины с мягким силиконовым слоем. На вершине бугров зубов–антагонистов интенсивность напряжений достигает значения 82 МПа. Таким образом, при воздействии нагрузки силой 400 Н и наличии шины с мягким силиконовым слоем напряжения на поверхности эмали верхнего зуба уменьшились в 4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов расчета напряженно-деформированного состояния в построенной конечно-элементной модели с граничными условиями с помощью программы *ANSYS* показал, что при использовании конструкции спортивной зубной шины из этиленвинилацетата интенсивность напряжений на поверхности эмали зуба при действии максимальной нагрузки силой 400 Н составляет 97 МПа, а с предложенной спортивной зубной шиной с силиконовым слоем – 82 МПа. Таким образом, уровень функциональных напряжений в эмали зубов снижается на 15 % при использовании зубной шины с силиконовым слоем в сравнении с защитной конструкцией без дополнительных слоев.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 17-48-590411.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абовян Р.А. Профилактика стоматологических заболеваний у бойцов Отряда милиции особого назначения в период выполнения служебно-боевых задач: автореф. дис. ... канд. мед.наук. – М., 2010. – 15 с.
2. Арутюнов С.Д., Ибрагимов Т.И., Кузнецов В.В., Абовян Р.А. Способ изготовления спортивных зубных шин // *Rosmedportal.com*. – 2011. – Т. 2. – С. 1–4.
3. Бабаев Е.Е., Сафаралиев Ф.Р. Коррекция нарушений стоматологического статуса у профессиональных спортсменов // *Проблемы стоматологии*. – 2014. – № 1. – С. 19–25.
4. Гаврилов Е.И., Щербаков А.С. Ортопедическая стоматология: учебное пособие для вузов – 4-е изд., доп. – СПб., 1994. – 536 с.
5. Загорский В.А. Протезирование при полной адентии.– М.: Медицина, 2008. – 376 с.
6. Карпович Д.И., Смоленский А.В., Михайлова А.В. Стоматологическая заболеваемость спортсменов, современные представления // *Вестник новых медицинских технологий*. – 2012. – Т. 19, № 2. – С. 55–57.
7. Кучумов А.Г., Лохов В.А., Няшин Ю.И., Менар М., Селянинов А.А. Численное решение задачи оптимизации для определения параметров установки фиксаторов с памятью формы // *Российский журнал биомеханики*. – 2009. – Т. 13, № 1. – С. 18–28.
8. Кучумов А.Г., Лохов В.А., Словиков С.В., Вильдеман В.Э., Штраубе Г.И., Суторихин Д.А. Экспериментальное исследование сплавов с памятью формы, применяющихся в медицине // *Российский журнал биомеханики*. – 2009. – Т. 13, № 3. – С. 7–19.
9. Лохов В.А., Кучумов А.Г., Мерзляков А.Ф., Асташина Н.Б., Ожгихина Е.С., Тропин В.А. Экспериментальное исследование материалов новой конструкции спортивной зубной шины // *Российский журнал биомеханики*. – 2015. – Т. 19, № 4. – С. 409–420.
10. Лохов В.А., Кучумов А.Г. Создание заданных усилий в фиксаторах, изготовленных из сплавов с эффектом памяти формы // *Российский журнал биомеханики*. – 2006. – Т. 10, № 3. – С. 41–52.
11. Лохов В.А., Няшин Ю.И., Кучумов А.Г., Менар М., Гачкевич А.Р., Будз С.Ф., Онышко А.Е. Применение материалов с эффектом памяти формы к лечению патологий зубочелюстной системы // *Российский журнал биомеханики*. – 2008. – Т. 12, № 4. – С. 7–17.
12. Соколова Н.И., Люгайло С.С. Стоматологическая превентология в спорте высших достижений // *Физическое воспитание студентов творческих специальностей*. – 2007. – № 4. – С. 63–68.
13. Хан А.В. Экспериментально-клиническое обоснование применения материала на основе эластического полиуретана для изготовления индивидуальных защитных спортивных кап: дис. ... канд. мед.наук. – М., 2011. – С. 22, 83–90, 176.
14. Badel T., Jerolimov V., Pandurić J. Dental/orofacial trauma in contact sports and intraoral mouthguard programmes // *Kinesiology*. – 2007. – Vol. 39, No. 1. – P. 97–105.
15. Kumamoto D., Maeda Y. A literature review of sports related orofacial trauma // *Gen. Dent.* – 2004. – Vol. 52, No. 3. – P. 270–280.
16. Lokhov V., Kuchumov A. Shape memory alloys in medicine: stress control problems in bone fracture healing // *Journal of Biomechanics*. – 2008. – Vol. 41. – P. 450.

COMPARATIVE EVALUATION OF FUNCTIONAL LOAD LEVELS IN THE TOOTH ENAMEL AT DIFFERENT TYPES OF SPORT MOUTHGUARDS

V.A. Lokhov, N.B. Astashina, E.S. Sergeeva, A.F. Merzlyakov,
A.A. Baydarov (Perm, Russia)

The study deals with a numerical analysis of the functional load distribution in the dental enamel taking into account the various types of personalized sport mouthguards. In the course of the experiment, a comparative biomechanical analysis is performed to determine the level of functional loading in the enamel of the teeth, without the use of protective guards and with the use of a traditional sport mouthguard made of ethylenevinyl acetate, as well as a new design with an additional absorbent silicone layer. Analysis of the results of the stress-strain state in the constructed finite element model with boundary conditions with the help of the ANSYS program shows that when using the design of a sport dental guard from ethylenevinyl acetate, the intensity of stresses on the tooth enamel surface under the action of a maximum load of 400 N is 97 MPa, and with the proposed sport dental guard with a silicone layer – 82 MPa. Thus, the level of functional stresses in tooth enamel is reduced by 15 % when using a dental guard with a silicone layer in comparison with a protective structure without additional layers.

Key words: sport mouthguard, ethylenevinylacetate, vinylpolysiloxane, Young's modulus, biomechanical modelling, mathematical analysis.

Получено 15 января 2017