

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОМЕХАНИКИ КОМПЛЕКСА «ЗУБ-ПЕРИОДОНТАЛЬНАЯ СВЯЗКА-КОСТНАЯ ТКАНЬ» В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

С.С. Наумович, Ф.Г. Дрик

Учреждение образования «Белорусский государственный медицинский университет»

(ректор – д.м.н., проф. Рубникович С.П.),

г. Минск, Республика Беларусь

ortopedstom@bsmu.by

Резюме. Новые данные об ответной реакции тканей периодонта на нагрузку позволяют понять процессы, протекающие в зубочелюстной системе при жевании, во время ортодонтического лечения и протезирования. Эксперимент *in vitro* на трупных сегментах нижней челюсти с сохраненной периодонтальной связкой проводился при нагружении отдельных зубов с последующей регистрацией деформации с применением метода голографической интерферометрии. Полученные результаты оценки деформации различных компонентов периодонта позволили высчитать усредненный коэффициент, отражающий соотношение степени деформации всего периодонтального комплекса к изолированной деформации костной ткани челюсти в области нагружаемого зуба. Данный параметр был равен $2,69 \pm 1,09$. Кроме этого был определен параметр, характеризующий степень деформации периодонтальной связки в зависимости от величины нагрузки, равный $1,89 \pm 1,15$ мкм/кгс. Определенные параметры в будущем могут использоваться для решения широкого круга научных и практических задач.

Ключевые слова: периодонтальная связка, костная ткань, напряженно-деформированное состояние, линейные свойства, голографическая интерферометрия.

INVESTIGATION OF THE BIOMECHANICS OF THE COMPLEX «TOOTH-PERIODONTAL LIGAMENT-BONE TISSUE» IN EXPERIMENT

S.S. Naumovich, F.G. Drik

Educational Institution "Belarusian State Medical University"

(Rector - MD, Prof. Rubnikovich S.P.),

Minsk, Republic of Belarus

Summary. New data on the response of periodontal tissues to the load allow us to understand the processes occurring in the dentition during chewing, orthodontic treatment and prosthetics. An *in vitro* experiment on cadaveric segments of the mandible with a preserved periodontal ligament was carried out when individual teeth were loaded with subsequent recording of deformations using the method of holographic interferometry. The obtained evaluation results of deformation of various periodontal components allowed to calculate the average coefficient reflecting the deformation ratio of all periodontal complex to an isolated strain of the jawbone in the area of the loaded tooth. This parameter has been equal to 2.69 ± 1.09 . In addition, the coefficient has been determined, characterizing the deformation of the periodontal ligament depending on the magnitude of the load, equal to 1.89 ± 1.15 $\mu\text{m/kgf}$. Determined parameters in the future can be used to solve a wide range of scientific and practical problems.

Keywords: periodontal ligament, bone tissue, stress-strained state, linear properties, holographic interferometry.

Введение. Математические модели в стоматологии для теоретического расчёта и анализа отличаются высоким уровнем упрощения биологических объектов до

простых геометрических фигур, что может снижать информативность исследований. В случаях, не поддающихся теоретическому анализу, эксперимент является

единственным способом определить характер деформаций и распределения напряжений. Модельные эксперименты обычно проводят при соблюдении геометрического подобия конструкций, но на других материалах, моделирующих поведение анализируемого. При всей несомненной полезности физического моделирования оно достаточно дорого, поэтому его стараются проводить, когда требуется либо окончательное подтверждение результатов математического моделирования, либо в случае, когда математическую модель не удается построить.

Морфологические особенности строения органов и тканей зубочелюстной системы давно и подробно изучены исследователями. В то же время, несмотря на достигнутые успехи, до сих пор остаются неизвестными многие особенности функционирования периодонтального комплекса, ключевым компонентом которого является периодонтальная связка [1]. Нагрузка на зубы, жевательная либо ортодонтическая, запускает в периодонтальном комплексе целый механизм реакций, которые врачи-стоматологи пока не могут полностью описать, несмотря на значительные достижения современной стоматологии. За последние десятилетия опубликованы десятки научных статей, описывающих изменения, происходящие в периодонте. Все исследователи признают главенствующую роль деформации периодонтальной связки, которая впоследствии запускает другие процессы. Важность связки определяется ее значительно менее прочными свойствами по сравнению с твердыми тканями зуба и костной тканью, которые можно условно считать абсолютно жесткими телами, если рассматривать диапазон обычных нагрузок.

Провести нагружение периодонтальной связки *in vivo* (на живом человеке) с одновременной регистрацией смещений и деформаций в периодонте на современном уровне развития науки не представляется возможным. В то же время эксперимент *in vitro*, чаще всего проводящийся на трупных сегментах челюстей человека либо животных имеет ряд ограничений и недостатков [2]. В первую очередь это

связано со сложностью сохранения периодонтальной связки в трупном материале. Также до настоящего времени не выработаны общие принципы и условия проведения эксперимента. Разные исследователи используют различные методы регистрации смещений зубов в периодонте: магнитные сенсоры, датчики напряжений, лазерные либо оптические регистраторы, что приводит к довольно большому разбросу результатов. Кроме этого, непосредственное внедрение датчиков в периодонтальную связку может вызвать ее разрушение, что изменит конечные данные. Поэтому параметры деформации связки косвенно оценивают по смещению зубов, однако, учитывая сложную форму корней, это также может оказать влияние на результат. Кроме этого данные литературы показывают, что ответная реакция периодонтальной связки может значительно различаться у разных людей, а также зависеть от величины и направления нагрузки, пола, возраста пациента и групповой принадлежности зуба [3].

Все вышесказанное свидетельствует о серьезной проблеме в экспериментальной оценке биомеханических процессов, протекающих в периодонтальной связке под действием жевательной либо ортодонтической нагрузки [4]. Поэтому актуальным является не только получение новых научных данных о реакции периодонтальной связки, но также разработка и систематизация новых методов и протоколов ее исследования.

Цель работы – разработать методику экспериментальной оценки биомеханики периодонта *in vitro* и оценить закономерности деформации периодонтальной связки под действием нагрузки.

Материалы и методы. Объектом исследования явились две трупных нижних челюсти человека с различным количеством сохранившихся зубов. Перед экспериментом макропрепараты нижней челюсти распилили на сегменты, включающие тело челюсти, альвеолярный отросток, периодонтальную связку и однокорневые зубы. Всего в эксперименте использовали 3 сегмента нижней челюсти, включающие суммарно 8

зубов: 4 резца, 3 клыка и 1 премоляр. Исследуемые образцы фиксировались к горизонтальной поверхности с помощью акриловой самотвердеющей пластмассы. Сегменты челюстей с многокорневыми зубами в эксперименте не использовались, так как точная регистрация деформаций на интерферограммах возможна только при передаче внешних усилий вдоль продольной оси зуба, а обеспечить данное условие на зубах с более чем одним корнем не представлялось возможным. Также для упрощения передачи внешней нагрузки вдоль оси корня каждого конкретного зуба

были спилены контактные пункты у исследуемых зубов, и было проведено препарирование окклюзионных поверхностей и режущих краев, с созданием площадок перпендикулярных длинной оси зуба. На полученные поверхности зуба наклеивались металлические шайбы для осевого центрирования нагрузки и ее равномерного распределения по окклюзионной поверхности зуба [5].

Получение интерферограмм проводилось методом двух экспозиций по контрнаправленной схеме (рис. 1).

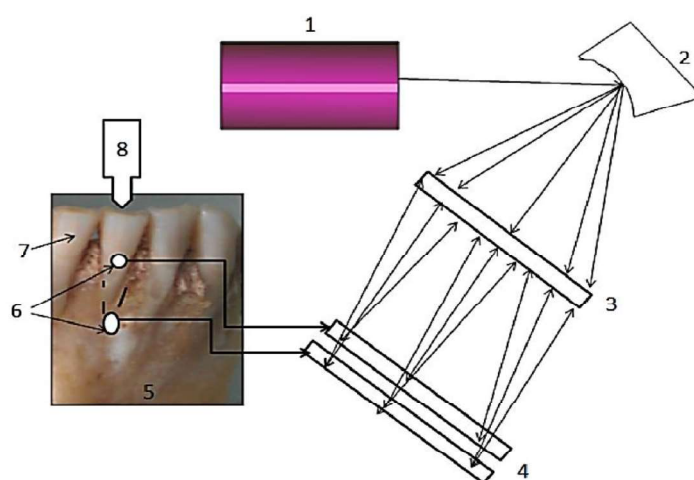


Рис. 1. Общая схема эксперимента.

1 – лазер, 2 – расширитель лазерного луча, 3 – фотопластина, для регистрации интерферограмм, 4 – датчики смещения, 5 – костная ткань челюсти экспериментального образца, 6 – опоры датчиков смещения, закрепленные на исследуемом зубе и костной ткани, 7 – исследуемые зубы, 8 – нагрузочное устройство

На фотопластинке фиксировалось изображение интерферограмм, отражающих смещение датчиков, опирающихся, соответственно, на вестибулярной поверхности исследуемого зуба и на костную ткань челюсти в области проекции верхушки корня. Подобная сложность регистрации объясняется невозможностью непосредственного контактного исследования периодонтальной связки. Поэтому степень ее деформации косвенно оценивалась по смещению нагружаемого зуба до момента появления деформации челюсти.

Первая экспозиция производилась при некоторой нагрузке F1, а вторая – при F2. Учитывая определенные ограничения метода исследования, разница между нагрузками

задавалась постоянной, равной 3 кгс (около 30 N), и последовательно сдвигалась вдоль абсолютной нагрузочной шкалы. Величина нагрузки могла варьировать до 30 кгс и более с помощью специального рычажного механизма.

Результаты и их обсуждение. В первоначальный момент действия нагрузки возникает осевое смещение исследуемого зуба только в пределах периодонтальной связки, за тем к нему присоединяется прогиб внутренней кортикальной пластинки. Эта деформация увеличивает количество интерференционных полос на лепестке датчика, фиксированном к зубу. Однако, вычитая количество интерференционных полос на лепестке датчика, фиксированном в области костной

ткани, можно получить реальное смещение зуба в пределах периодонтальной связки.

Результаты эксперимента не выявили определенной закономерности по функциональным группам зубов, что, в первую очередь, связано с малым количеством исследуемых образцов. В процессе обработки данных каждого образца нами были отмечены довольно схожие цифры коэффициента, обозначенного нами как N , который характеризует соотношение степени деформации всего комплекса «зуб-связка-кость», к степени деформации костной ткани. Для всех экспериментальных образцов он незначительно колебался в небольшом диапазоне от средних значений. Поэтому мы полагаем, что данный коэффициент может рассматриваться как определенная константа. Этот показатель характеризует во сколько раз деформация костной ткани меньше суммарной деформации всего периодонта. И по результатам нашего эксперимента средняя величина коэффициента с учетом среднеквадратического отклонения равна $2,69 \pm 1,09$.

Также при обработке данных по деформации отдельных зубов мы выделили отдельный параметр, характеризующий степень деформации связки в зависимости от величины нагрузки и обозначенный нами, как интегральный коэффициент K . Среднее значение данного параметра составило $K = 5,97 \pm 3,63$. Зная длину волны гелий-неонового лазера, использовавшегося для регистрации интерферограмм, $632,8$ нм, мы смогли перевести данный коэффициент в реальную величину смещения зуба в периодонтальной связке. Так была получена

деформация связки равная $1,89 \pm 1,15$ мкм/кгс. Следует отметить, что данная величина характеризует смещение зуба в связке только вдоль его вертикальной оси, что связано с особенностями метода регистрации.

Заключение. Уникальная природа периодонтальной связки не позволяет при ее исследовании использовать классические экспериментальные методы. Разработанный подход по использованию голографической интерферометрии на трупных образцах, включающих комплекс тканей «зуб - периодонтальная связка - костная ткань», позволил оценить биомеханику смещения зуба и, косвенно, деформацию связки. Принимая во внимание все ограничения и допущения в постановке эксперимента, следует отметить довольно информативный характер полученных результатов. Учитывая имеющийся в научной литературе небольшой набор данных и спорадический характер проводимых экспериментов, наряду с уникальностью биомеханических свойств периодонтальной связки, необходимо сделать акцент на дальнейшем усовершенствовании данного метода, а также разработке стандартов и протоколов исследования. Новые эксперименты должны оценивать влияние различных факторов (например, возраст, пол, групповая принадлежность зуба и т.п.) параметры деформации связки. Кроме этого, весьма перспективным видится изучение биомеханических свойств периодонта не только на экспериментальных образцах *in vitro*, но и непосредственно на человеке, с учетом всех его индивидуальных особенностей.

Литература

1. Fill, T.S., Toogood, R.W., Major, P.W., Carey, J.P. Analytically determined mechanical properties of, and models for the periodontal ligament: critical review of literature. *J Biomech.* 2012;45(1):9-16.
2. Liu, D.X., Wang, H.N., Wang C.L., Liu H., Sun, P., Yuan, X. Modulus of elasticity of human periodontal ligament by optical measurement and numerical simulation. *Angle Orthodontist.* 2011; 81(2):229-236.
3. Ted, S.F., Carey, J.P., Toogood, R.W., Major, P.W. Experimentally Determined Mechanical Properties of, and Models for, the Periodontal

Ligament: Critical Review of Current Literature // Journal of Dental Biomechanics. 2011. doi:10.4061/2011/312980.

4. Papadopoulou, K., Keilig, L., Eliades, T., Krause, R., Jäger, A., Bourauel, C. The time-dependent biomechanical behaviour of the periodontal ligament--an *in vitro* experimental study in minipig mandibular two-rooted premolars. *Eur J Orthod.* 2014;36(1):9-15.

5. Наумович С.С., Дрик Ф.Г. Биомеханические свойства комплекса «зуб-периодонтальная связка - костная ткань» в эксперимент. *Современная стоматология.* 2017;2:58-61. https://doi.org/10.54890/1694-6405_2022_2_83