

С. С. Наумович, С. А. Наумович

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРИОДОНТАЛЬНОЙ СВЯЗКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА И РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПОРНЫХ ЗУБОВ В МОСТОВИДНЫХ ПРОТЕЗАХ

Часть 2

УО «Белорусский государственный медицинский университет»

Вторая часть статьи описывает напряженно-деформированное состояние периодонтальной связки опорных зубов в мостовидном протезе, корни которых рассматриваются в виде модели эллиптического гиперблоида. Рассмотрены различные варианты мостовидных протезов по количеству опорных и искусственных зубов, высоте костной ткани межзубных перегородок. По результатам рассчитанных с применением метода математического моделирования напряжений предложены рекомендации по выбору конструкций мостовидных протезов в различных клинических ситуациях.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, мостовидный протез, периодонтальная связка, эллиптический гиперблоид, математическое моделирование.*

S. S. Naumovich, S. A. Naumovich

STRESS-STRAINED CONDITION OF PERIODONTAL LIGAMENT DEPENDING ON THE LOCATION AND AMOUNT OF ABUTMENT TEETH IN FIXED PARTIAL DENTURES. PART 2.

The second part of the article describes the stress-strained condition of the periodontal ligament of the abutment teeth in fixed partial dentures, the roots of which are considered in a model of an elliptic hyperboloid. Different variants of bridges with variable parameters of the number of abutment and artificial teeth, alveola bone height have been studied. According to the results of stresses calculated using the method of mathematical modeling recommendations for choice of design of bridges in various clinical situations have been suggested.

Key words: *stress-strained condition, fixed partial denture, periodontal ligament, an elliptic hyperboloid, mathematical modeling.*

В первой части статьи представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния периодонтальной связки опорных зубов в мостовидном протезе при различных углах наклона зубов как в мезиодистальном, так и в вестибулооральном направлениях. Полученные данные по нормальным и касательным напряжениям в области соединения периодонтальных волокон и корня зуба могут служить дополнительным научно обоснованным критерием при выборе конструкций несъемных мостовидных протезов.

В то же время достаточно актуальной проблемой ортопедической стоматологии является выработка рекомендаций по включению в конструкцию мостовидных протезов дополнительных опорных зубов, кроме зубов, ограничивающих дефект зубного ряда [2, 3, 4, 5, 8, 9]. На протяжении многих десятилетий предлагались различные варианты решения данной проблемы. Наиболее широкую известность в международной литературе по стоматологии получил закон Анте (Ante's law, 1928 г.), который гласит, что общая площадь поверхности корневого цемента (периодонтальной связки) опорных зубов в мостовидном протезе должна быть равна либо больше общей площади поверхности корней отсутствующих зубов. Белорусская стоматологическая школа, являющаяся выходцем из школы советской, активно в своей работе использовала одонтопародонтограмму, предложенную В. Ю. Курляндским. Впоследствии она была неоднократно модифицирована с учетом современных возможностей математического моделирования.

Цель работы – рассчитать на модели корня зуба в виде эллиптического гипербоида напряжения, возникающие в периодонтальной связке опорных зубов в мостовидном протезе при изменении высоты межзубных перегородок, количества и пространственного расположения опорных зубов.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели использовалась аналитическая модель периодонтальной связки, разработанная А. Е. Крушевским и С. А. Наумовичем [1]. Данная математическая модель имеет определенные упрощения в геометрии и механических свойствах периодонта, что не позволяет использовать ее в должной мере для получения абсолютных величин напряжений [6, 7, 10]. В то же время данная модель достаточно объективно описывает изменения, происходящие в периодонте при изменении параметров корней. Периодонтальная связка в рассматриваемой модели представляет собой упругую прослойку с линейными и изотропными свойствами, ограниченную двумя составленными эллиптическими двуполостными гипербоидами. Одним из гипербоидов является поверхность цемента корня зуба, а другой – внутренняя стенка альвеолы.

Мостовидные протезы рассматривались как абсолютно твердые тела вместе с корнями зубов, которые служат опорами протезов. В результате моделирования получали

величины перемещений зубов в периодонтальной связке и возникающие при этом 3 компонента напряжений на поверхности корня зуба: нормальные и касательные вдоль образующей и направляющей.

Результаты и обсуждение

1) *Результаты моделирования напряжений в периодонте при изменении расстояния между опорными зубами в мостовидном протезе в норме и при различной степени резорбции стенок альвеолы.*

Была построена математическая модель мостовидного протеза с двумя однокорневыми опорами, которые располагались в одной плоскости. Для моделирования дефектов зубного ряда различной протяженности расстояние между опорными зубами изменяли на 0,7 см, что соответствует в среднем поперечному размеру однокорневого зуба в мезиодистальном направлении. Таким способом смоделировали мостовидный протез, восстанавливающий дефект зубного ряда в 2, 3 и 4 зуба соответственно. Расстояние между центрами опорных зубов в 0,7 см означает, что дефект зубного ряда отсутствует и так смоделирована несъемная шина, включающая 2 зуба. К протезу прикладывали внешнюю нагрузку величиной в 30 кг, действующую вертикально на один из зубов. В модели использовали именно одностороннюю нагрузку, так как при рассмотрении мостовидных протезов в виде абсолютно твердых тел (т. е. тел, которые не деформируются сами, а только передают нагрузку) приложение силы посередине протеза не приводит к изменению напряжений в периодонте опорных зубов при увеличении протяженности дефекта зубного ряда. Были получены значения нормальных и тангенциальных напряжений в каждой из опор, что позволило определить, как происходит перераспределение нагрузки между опорными зубами мостовидного протеза при изменении протяженности дефекта зубного ряда. Напряжения были рассчитаны для зубов с интактным периодонтом, а также при 25% и 50% атрофии костной ткани.

Результаты математического моделирования представлены на графиках (рисунки 1–4), которые построены для случаев, моделирующих напряженно-деформированное состояние при нормальной высоте костной ткани.

Анализ полученных результатов моделирования и построенных на их основе графиков 1–4 показывает, что при увеличении протяженности дефекта зубного ряда и нагрузке вдоль длинных осей опорных зубов

1. Происходит уменьшение нормальных напряжений в периодонте опорных зубов, за исключением верхушки корня зуба, в области которого приложена нагрузка. Это свидетельствует о том, что происходит вертикальное внедрение корней зубов в периодонт.

2. Касательные напряжения в периодонте ненагружаемого опорного зуба уменьшаются, причем при протяженных дефектах тангенциальные напряжения вдоль образующей практически исчезают.

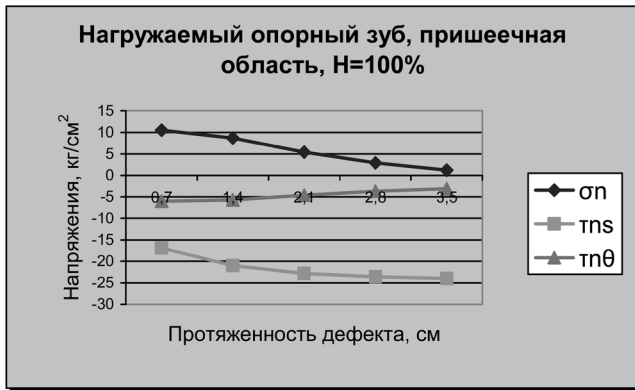


Рисунок 1. Нормальные и тангенциальные напряжения в периодонте в зависимости от расстояния между опорными зубами и степени атрофии костной ткани

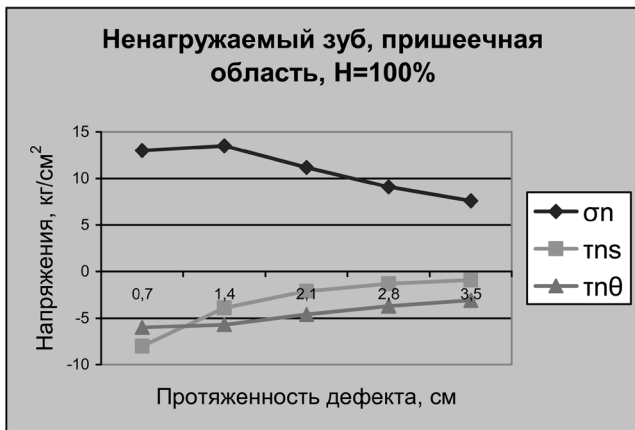


Рисунок 2. Нормальные и тангенциальные напряжения в периодонте в зависимости от расстояния между опорными зубами и степени атрофии костной ткани

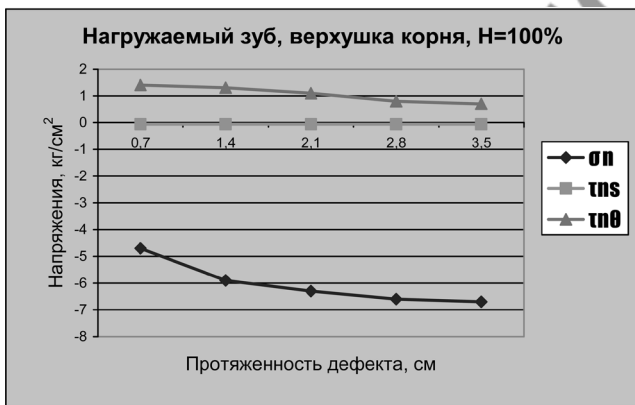


Рисунок 3. Нормальные и тангенциальные напряжения в периодонте в зависимости от расстояния между опорными зубами и степени атрофии костной ткани

3. В периодонте зуба, к которому приложена нагрузка, увеличиваются тангенциальные напряжения вдоль образующей и нормальные напряжения в области верхушки корня, что свидетельствует о перегрузке опорного зуба.

4. При атрофии костной ткани происходит увеличение нормальных и касательных напряжений в периодонте опорных зубов, однако, если в нагружаемом зубе напряжения увеличиваются в среднем в 1,5 и 2,5 раза при 25% и 50% атрофии соответственно вне зависимости от количества отсутствующих зубов, то в ненагружаемом зубе нормальные напряжения при отсутствии дефекта увеличиваются в 1,5 и 2,5 раза при 25% и 50% атрофии соответственно, а при дефекте в 4 зуба всего лишь в 1,1 и 1,4 раза. Таким

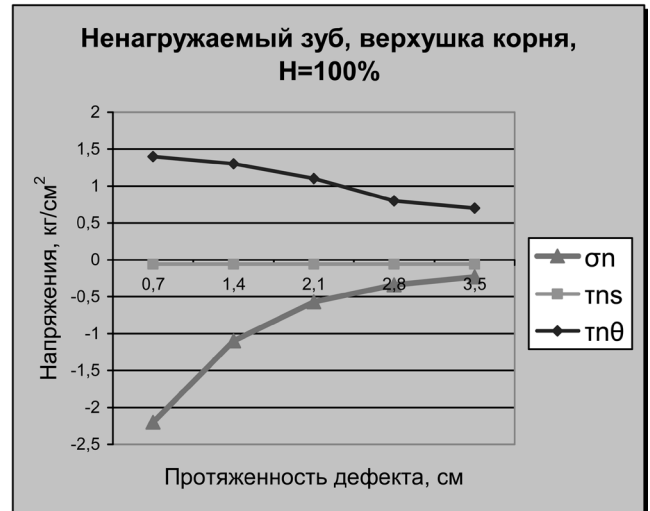


Рисунок 4. Нормальные и тангенциальные напряжения в периодонте в зависимости от расстояния между опорными зубами и степени атрофии костной ткани

образом, чем протяженнее дефект зубного ряда, тем меньше перераспределение нагрузки между опорными зубами при ее несимметричном приложении. В то же время нагрузка, действующая строго посередине мостовидного протеза, не изменяет напряжения в периодонте при изменении протяженности дефектов зубных рядов.

5. Включение дополнительных зубов (более одного с каждой стороны дефекта зубного ряда) в норму актуально при отсутствии более 3 зубов, при резорбции костной ткани на 25% высоты межзубных перегородок допустимо протезирование дефектов в 1 зуб без дополнительных опорных зубов, а при 50% резорбции дефект зубного ряда во фронтальном отделе протяженностью в 1 зуб требует дополнительных опорных зубов.

2) Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния периодонтальной связки многоопорных мостовидных протезов при различной степени атрофии костной ткани.

Актуальным также является изучение влияния числа опорных зубов мостовидного протеза на напряженно-

Таблица 1. Значения нормальных и тангенциальных напряжений в зависимости от количества опорных зубов и степени атрофии костной ткани

Высота костной ткани	Количество опорных зубов, абс.	Максимальное напряжение, кг/см ²		
		σ_n	τ_{ns}	$\tau_{n\theta}$
H = 100%	2	-4,13	-12,46	-0,42
	3	-2,75	-8,31	-0,28
	4	-2,06	-6,23	-0,21
	5	-1,65	-4,99	-0,17
H = 75%	2	-7,27	-17,53	-0,78
	3	-4,84	-11,68	-0,52
	4	-3,63	-8,76	-0,39
	5	-2,91	-7,01	-0,31
H = 50%	2	-15,31	-32,33	-1,31
	3	-10,21	-21,55	-0,88
	4	-7,66	-16,16	-0,66
	5	-6,13	-12,93	-0,53
H = 25%	2	-61,56	-112,19	-6,13
	3	-41,04	-74,80	-4,09
	4	-30,78	-56,10	-3,07
	5	-24,62	-44,88	-2,45

деформированное состояние периодонта опорных зубов. Для расчета нами была построена модель мостовидного протеза, восстанавливающего дефект зубного ряда в 2 зуба. Все зубы в модели имели одинаковые геометрические параметры корней. К протезу прикладывали равномерно распределенную вертикальную нагрузку величиной в 30 кг. Для каждого случая к опорным зубам, ограничивающим дефект зубного ряда поочередно добавляли с каждой стороны по 1 либо по 2 дополнительных зуба. Так как нагрузка была направлена строго вдоль оси опорных зубов, то в периодонте возникали только отрицательные по величине напряжения сжатия. Поэтому в качестве сравнительных величин в таблицу 1 заносили максимальные нормальные и касательные напряжения, возникающие в периодонте опорных зубов.

Общая схема различных вариантов математической модели мостовидного протеза представлена на рисунках 5–6.

Результаты моделирования представлены на графиках 7–9.

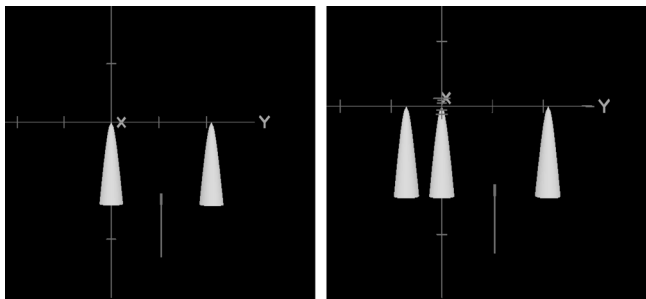


Рисунок 5. Схемы двух- и трехопорного мостовидного протеза

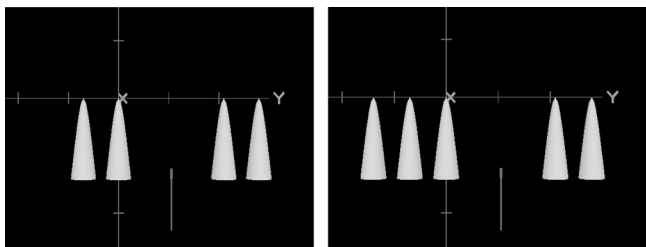


Рисунок 6. Схемы мостовидного протеза с 4 и 5 опорными зубами

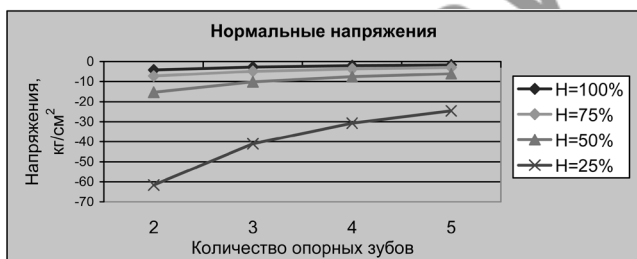


Рисунок 7. Нормальные напряжения в периодонте в зависимости от числа опорных зубов в мостовидном протезе

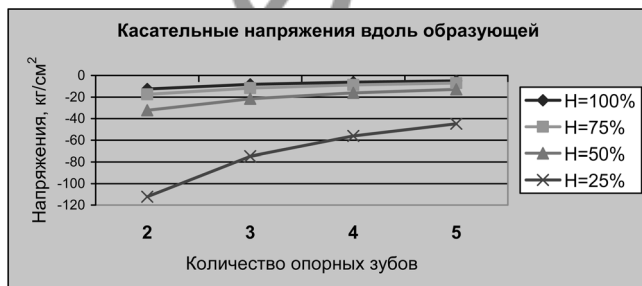


Рисунок 8. Касательные напряжения вдоль образующей в периодонте в зависимости от числа опорных зубов в мостовидном протезе

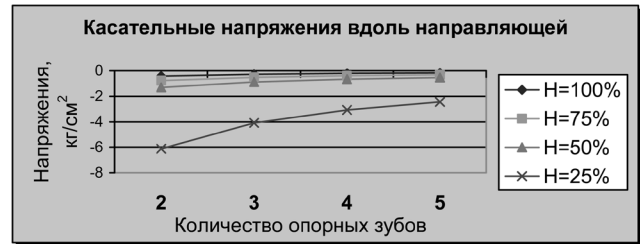


Рисунок 9. Касательные напряжения вдоль направляющей в периодонте в зависимости от числа опорных зубов в мостовидном протезе

Анализ таблицы 1 и графиков позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Включение дополнительных опорных зубов в конструкцию мостовидного протеза одинаково снижает максимальные величины нормальных и касательных напряжений в периодонте при любой степени атрофии костной ткани. Так, по сравнению с 2 опорными зубами напряжения при 3 опорных зубах меньше в 1,5 раза, при 4 – в 2 раза, при 5 – в 2,5 раза. Такая прямая зависимость уменьшения напряжений объясняется одинаковыми размерами корней опорных зубов, включенных в модель. В реальности же все зубы имеют неодинаковые размеры, поэтому наиболее оправдано включать в конструкцию мостовидного протеза дополнительные зубы с большими по величине корнями.

2. Наибольшее снижение напряжений – на 1/3 – происходит при включении одного дополнительного зуба. Включение же последующих дополнительных опорных зубов уменьшает исходные напряжения только на 1/4 (при 4 опорных зубах) и на 1/5 (при 5 опорных зубах).

3. Атрофия костной ткани на 25% вызывает увеличение нормальных напряжений в 1,76 раза, касательных вдоль образующей – в 1,41 раза, вдоль направляющей – в 1,86 раза.

4. Атрофия костной ткани на 50% вызывает увеличение нормальных напряжений в 3,7 раза, касательных вдоль образующей – в 2,6 раза, вдоль направляющей – в 3,1 раза.

5. Атрофия костной ткани на 75% вызывает увеличение нормальных напряжений в 14,9 раза, касательных вдоль образующей – в 9 раз, вдоль направляющей – в 14,6 раза.

6. По одному опорному зубу с каждой стороны дефекта зубного ряда достаточно для включения в состав мостовидного протеза при нормальной высоте костной ткани, а также при атрофии на 1/4, включение дополнительных опорных зубов оправдано при 50% атрофии.

7. Протезирование мостовидными протезами при атрофии на 3/4 проводить нельзя, так как даже при включении дополнительных зубов в конструкцию протеза происходит значительная перегрузка опорных зубов.

Результаты математического моделирования позволили выявить влияние пространственного расположения, размеров и числа опорных зубов в норме и при различной степени атрофии костной ткани на напряженно-деформированное состояние периодонта. Это позволило уточнить показания и противопоказания при протезировании мостовидными протезами, а также определить критические значения углов наклона зубов, атрофии костной ткани, протяженности дефектов зубных рядов, требующие включения в конструкцию мостовидного протеза более одного опорного зуба с каждой стороны дефекта зубного ряда.

Литература

1. Наумович, С. А. Биомеханика системы зуб-периодонт / С. А. Наумович, А. Е. Крушевский. Минск, 2000. 168 с.
2. Fayyad, M. A. Failure of dental bridges. IV. Effect of supporting periodontal ligament / M. A. Fayyad, M. A. Al-Rafee // J. Oral Rehabil. 1997. Vol. 24. № 5. P. 401–403.

□ Оригинальные научные публикации

3. *Himmlova, L.* Influence of implant length and diameter on stress distribution: a finite element analysis / L. Himmlova [et al.] // J. Prosthet. Dent. 2004. Vol. 91, № 1. P. 20–25.

4. *Lin, C. L.* Biomechanical interactions in tooth-implant-supported fixed partial dentures with variations in the number of splinted teeth and connector type: a finite element analysis / C. L. Lin, J. C. Wang, W. J. Chang // Clin. Oral Implants Res. 2008. Vol. 19, № 1. P. 107–117.

5. *Meriç, G.* Biomechanical effects of two different collar implant structures on stress distribution under cantilever fixed partial dentures / G. Meriç [et al.] // Acta Odontol Scand. 2011. Vol. 69, № 6. P. 374–384.

6. *Natali, A. N.* A multi-phase media formulation for biomechanical analysis of periodontal ligament / A. N. Natali [et al.] // Meccanica. 2002. Vol. 37, № 4–5. P. 407–418.

7. *Naveau, A.* Biomechanical behaviour of tooth-supported fixed partial dentures by 3D FEA / A. Naveau [et al.] // Eur J Prosthodont Restor Dent. 2009. Vol. 17, № 4. P. 157–163.

8. *Oruc, S.* Stress analysis of effects of nonrigid connectors on fixed partial dentures with pier abutments / S. Oruc [et al.] // J. Prosthet Dent. 2008. Vol. 99, № 3. P. 185–192.

9. *Pietrzak, G.* A nonlinear elastic model of the periodontal ligament and its numerical calibration for the study of tooth mobility / G. Pietrzak [et al.] // Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin. 2002. Vol. 5, № 2. P. 91–100.

10. *Wang, C. H.* Methods to improve a periodontally involved terminal abutment of a cantilever fixed partial denture—a finite element stress analysis / C. H. Wang [et al.] // J. Oral Rehabil. 1998. Vol. 25, № 4. P. 253–257.

Поступила 16.10.2012 г.