

Коэффициент Пуассона эмали, дентина и стоматологических реставрационных материалов

С.А. МУСЛОВ*, д.биол.н., профессор

Н.В. ЗАЙЦЕВА*, к.пед.н., доцент

С.Д. АРУТЮНОВ**, д.м.н., профессор

*Кафедра нормальной физиологии и медицинской физики

**Кафедра пропедевтической стоматологии

ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава РФ

The Poisson's Ratio of enamel, dentin and dental restoration materials

S.A. MUSLOV, N.V. ZAITSEVA, S.D. ARUTYUNOV

Резюме

Коэффициент Пуассона (μ) – одна из независимых материальных констант твердого тела. Для твердых тканей зуба коэффициент Пуассона должен соответствовать коэффициенту Пуассона реставрационных материалов во избежание перенапряжений на границе разделов реставрационный материал – эмаль и реставрационный материал – дентин на микроскопическом уровне. В данной работе на основе ориентационных зависимостей рассчитаны экстремальные (минимальный и максимальный) коэффициенты Пуассона дентина и эмали. При анализе дентин и эмаль рассматривали как анизотропную среду с гексагональной симметрией и известной матрицей упругих постоянных. Установлено, что интервал возможных значений коэффициента Пуассона дентина и эмали значительно шире диапазона изменений коэффициента Пуассона известных стоматологических композиционных материалов, что в ряде случаев может снижать качество реставраций в микрообъемах. Впервые выявлено, что максимальное значение коэффициента Пуассона дентина (0,534) выше теоретического предела для коэффициента Пуассона изотропных материалов.

Ключевые слова: дентин, эмаль, коэффициент Пуассона, кристаллы гидроксиапатита, реставрационные материалы.

Abstract

The Poisson ratio and the Young's modulus form a pair of independent material constants of solids. For hard tooth tissues the Poisson's ratio should correspond to the Poisson's ratio of restorative materials in order to avoid overstresses at the border of the sections, restoration material-enamel and restoration material-dentin on microscopic level. In this paper on base orientation dependencies the extremal (minimum and maximum) Poisson's coefficients of dentin and enamel are calculated. In the analysis, dentin and enamel was considered as an anisotropic medium with hexagonal symmetry with a known matrix of elastic constants. It is established that the interval of possible values of the Poisson's ratio of dentin and enamel is much wider than the range of changes in the Poisson's ratio of known dental composite materials, which in some cases can reduce the quality of restorations in microvolumes. It is shown that the maximum value of the Poisson's ratio of dentin (0.534) is greater than the upper theoretic limit for the Poisson's ratio of isotropic materials.

Key words: dentin, enamel, Poisson's ratio, the crystals of hydroxyapatite, restoration materials.

ВВЕДЕНИЕ

Упругие свойства твердых тканей зуба и гидроксиапатита, как минеральной их составляющей, достаточно часто вызывают интерес у исследователей [2-4]. Однако остаются актуальными и до конца неизученными ряд аспектов этой тематики, в частности величина коэффициента Пуассона (поперечной деформации) дентина и эмали как анизотропных сред с кристаллической симметрией. Этот вопрос особенно представляет интерес с позиций прочностных свойств тканей зуба, представляющих в контексте теории разрушения микронеоднородную среду со сложным характером напряженно-деформированного состояния на микроскопическом уровне. Анизотропия и неоднородность твердых тканей зуба сред повышают степень концентрации микронапряжений, ответственных за возникновение микротрещин Гриффитса и пластических деформаций,

в зависимости от степени анизотропии и неоднородности. В данном сообщении мы представляем исследование величины коэффициента Пуассона дентина и эмали как анизотропной среды, отнесенной к гексагональной сингонии – три элементарных ячейки образуют правильную призму на шестигранном основании.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании известной матрицы упругих постоянных рассчитать экстремальные (минимальный и максимальный) коэффициенты Пуассона дентина и эмали и сравнить их с коэффициентом Пуассона стоматологических реставрационных материалов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении расчетов твердые ткани зуба рассматривали как анизотропную среду с гекса-

гональной симметрией вследствие общепринятых представлений о кристаллической структуре минеральной составляющей тканей как биоккомпозита (минерально-органического комплекса). Численные исследования коэффициента Пуассона эмали и дентина проводили с использованием системы компьютерной алгебры Mathcad и специального компьютерного обеспечения на основании известных значений упругих постоянных и коэффициентов податливости. Оценку результатов исследований проводили с использованием положений теории разрушения твердых тел Гриффитса на основе образования и развития микротрещин вследствие механических перенапряжений, возникающих по причине различий механических свойств (μ) дентина и реставрационного материала.

РАСЧЕТЫ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что коэффициент Пуассона характеризует отношение поперечной деформации к продольной при внешнем воздействии и является одной из основных упругих констант материала. Он служит весьма информативной характеристикой при анализе деформационного поведения твердых тел. Для изотропных упругих тел, увеличивающих свой объем при растяжении и уменьшающих при сжатии, величина μ лежит в пределах от 0 до 0,5. Практически для большинства материалов коэффициент Пуассона находится в еще более узком интервале: от 0,2 до 0,4. Для дентина коэффициент Пуассона по сведениям литературы лежит в интервале 0,29-0,33. По результатам ультразвуковых измерений он равен 0,32, для эмали – 0,28 [7]. Величина коэффициента Пуассона дентина и эмали, кроме того, важна в сравнении с соответствующим коэффициентом материалов для стоматологических реставраций. Последний, согласно доступным литературным данным, полученных с помощью различных методов исследования (табл. 1), в среднем равен $0,315 \pm 0,067$ ($M \pm \sigma$) и изменяется в весьма широких пределах с межквартильным интервалом $IQR = 0,11$. При этом $\mu_{min, реставр. мат.} = 0,23$, а $\mu_{max, реставр. мат.} = 0,44$.

Отметим, что для идеальной реставрации необходима полная идентичность физико-механических свойств дентина и реставрационного материала, в том числе равенство их коэффициентов Пуассона: $\mu_{дент.} = \mu_{реставр. мат.}$. Аналогичные рекомендации актуальны и для повышения прочностных характеристик комплекса «дентин – фиксирующий цемент», исследованных в [1].

Однако все данные литературы о коэффициенте Пуассона дентина приведены без учета анизотропии физико-механических свойств твердых тканей зуба, обусловленной их внутренним строением. Считается, что несмотря на разновидности дентин представляет собой биоккомпозит и состоит приблизительно на 45-70% из неорганического ма-

Таблица 1. Коэффициент Пуассона стоматологических композиционных материалов

Источник	Материал	Производитель	μ	Метод исследования
Chabrier et al. [5]	Lite-Fil IIA	Shofu	0,44	Статическое сжатие
	Lite-Fil IIP	Shofu	0,43	
	Z100	3M	0,40	
	Compomer Dyract AP	Dentsply	0,28	
Nakayama et al. [6]	Adaptic	Johnson & Johnson	0,24	Динамические ультразвуковые исследования
	Addent XV	3M	0,31	
	Blendant	Kerr	0,26	
	HL-72	Lee Pharms.	0,30	
Whiting and Jacobsen [9]	Adaptic	Johnson & Johnson	0,23	Динамические ультразвуковые исследования
	Concise	3M	0,25	
	Cosmic	Amalgamated Dental	0,27	
	Prestige	Lee Pharms	0,26	
Sew Meng Chung et al. [8]	A110	3M	0,37	Статическое растяжение
	Z100	3M	0,30	
	Filtek Z250	3M	0,31	
	Compomer F2000	3M	0,32	
	Filtek Flowable	3M	0,39	

териала в форме кристаллитов минеральных веществ, в основном апатитов. Кристаллиты расположены между коллагеновыми волокнами и по классу симметрии относятся к гексагональной сингонии. Поэтому есть все основания рассматривать дентин (особенно в коронковой части зуба) как анизотропную среду, а это значит, что его упругие свойства описываются матрицей упругих постоянных c_{ij} и коэффициентов податливости s_{ij} . Коэффициенты Пуассона такой среды в общей форме могут быть определены как

$$\mu_{kl} = -\epsilon_{ll} / \epsilon_{kk},$$

где ϵ_{kk} – компоненты тензора деформации.

В результате гексагональные системы и дентин описываются не одним, а двумя коэффициентами Пуассона μ'_{31} и μ'_{32} [10]. Здесь ось Ox_3 ортогональной системы координат x_i параллельна оси кристаллов шестого порядка, а оси Ox_1 и Ox_2 занимают любое из двух возможных направлений в плоскости, нормальной к Ox_3 (базальной плоскости). Суть штрихов в обозначениях – наличие ориентационной зависимости μ кристаллов. Результаты вычисления коэффициентов Пуассона дентина как кристаллической системы с гексагональной структурой представле-

Таблица 2. Экстремальные значения коэффициента Пуассона (μ_{min} , μ_{max}), значения коэффициента Пуассона в частных кристаллографических ориентациях минеральной составляющей дентина, эмали и диапазон изменения коэффициента Пуассона композиционных материалов

Материал	μ_{min}	μ_{max}	$\mu_{[2\bar{1}\bar{1}0], [0001]}$	$\mu_{[01\bar{1}0], [2\bar{1}\bar{1}0]}$	$\mu_{[0001], [2\bar{1}\bar{1}0]}$
Дентин	0,132	0,534	0,16	0,13	0,42
Эмаль	0,16	0,47	0,19	0,16	0,33
Композиционные материалы	0,23	0,44	–	–	–

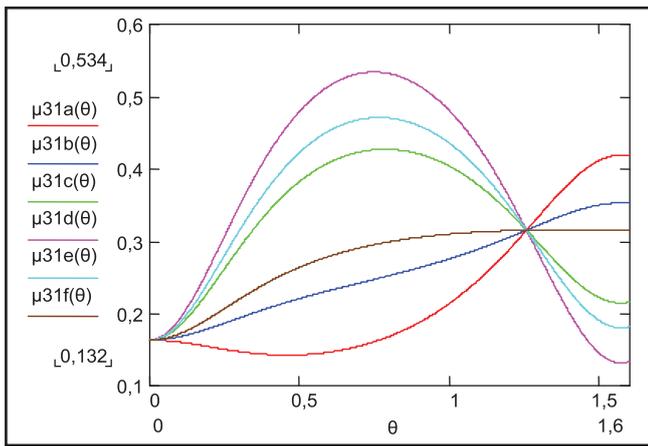


Рис. 1. Коэффициент Пуассона дентина μ'_{31} для различных углов Эйлера θ и ψ . $\theta = 0 \div \pi/2$, а-ф: $\psi = 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ рад.

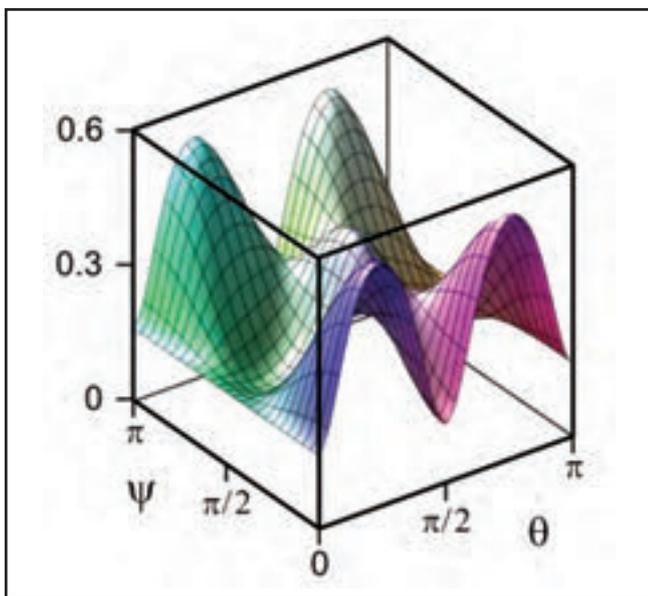


Рис. 2. Изменчивость коэффициента Пуассона дентина μ'_{31} в пространстве

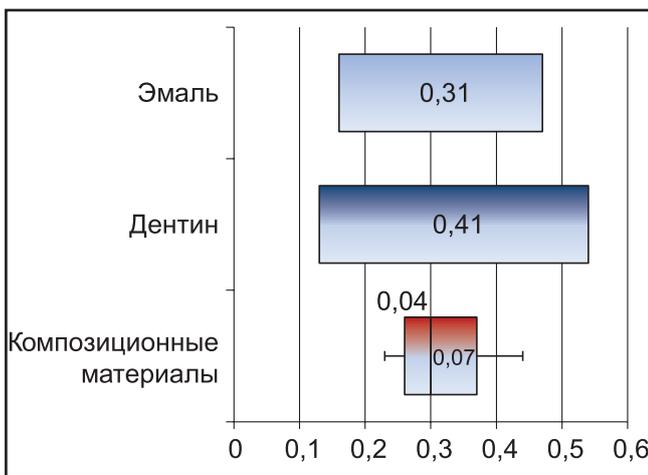


Рис. 3. Диапазоны изменений коэффициента Пуассона ($\max \mu - \min \mu$) эмали, дентина и область значений коэффициента Пуассона μ композиционных материалов

ны на рисунках 1-3 и в таблице 2. Вследствие симметрии и для простоты изложения графики приведены только для $\mu'_{31}(\theta)$, где θ – один из углов Эйлера. Из представленных данных отчетливо следует выраженное анизотропное поведение коэффициента Пуассона дентина. Его значения в зависимости от направлений продольной и поперечной деформаций изменяются в весьма широких пределах (в 4 с лишним раза): $\min \mu'_{31}(\theta) = 0,132$, $\max \mu'_{31}(\theta) = 0,534$, диапазон изменения 0,412. При этом $\max \mu'_{31}(\theta) > \mu_{\text{макс}}$, реставр. мат. и $\min \mu'_{31}(\theta) < \mu_{\text{мин}}$, реставр. мат., т.е. область значений коэффициента Пуассона дентина шире (причем существенно) соответствующей области для реставрационных композитов (рис. 3). В результате для значительной части микрообластей дентина с определенной пространственной ориентацией минеральной составляющей $\mu_{\text{дент}} \neq \mu_{\text{реставр.мат}}$, что не соответствует условию идентичности механических свойств дентина и реставрационного материала.

Наряду с высокой упругой анизотропией отметим аномальную величину максимального значения коэффициента Пуассона (0,534) вдоль ряда направлений, что крайне необычно для материалов, в том числе стоматологических реставрационных композитов. Это означает, что при сжатии локальных областей дентина, обладающих упругой анизотропией, вдоль этих направлений их объем может увеличиваться, а при растяжении – наоборот, уменьшаться. Упругое поведение под нагрузкой реставрационного материала принципиально другое. Коэффициент Пуассона пломбирочного материала существенно меньше 0,5, поэтому, как обычно, при сжатии его объем уменьшается, а при растяжении – увеличивается. Это несоответствие в деформационном поведении пломбирочного материала и дентина на микроскопическом уровне может привести к образованию доменов перенапряжений σ и раннему старту микротрещин на границе сред ($k_{\text{р}} \sim 1/\sigma^2$). За этим возможна деградация и часто встречаемая ситуация разрушения прямой, а порой и не прямой реставрации, особенно композиционными материалами.

В заключение отметим, что такой же анализ был выполнен и для эмали зубов (табл. 2, рис. 3), состоящей из неорганических минералов, в основном кристаллов апатитов с гексагональной структурой, на 90-97%. В результате исследования ориентационной зависимости коэффициента Пуассона эмали зуба были получены результаты, схожие с изложенными для дентина. Можно отметить только меньшую упругую анизотропию ($\max \mu / \min \mu$) эмали по сравнению с дентином и соответственно более узкий диапазон изменений ($\max \mu - \min \mu$) эмали в зависимости от кристаллографической ориентации продольной и поперечной деформаций, что является несколько неожиданным результатом и требует осмысления и дальнейшего изучения. Аналогичные данные были получены авторами [4], которые исследовали упругую анизотропию дентина и эмали с помощью стандартных параметров, а именно соотношений экстремальных (максимальных и минимальных) значений соответствующих упругих модулей.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР (2017-2021 гг.) кафедры нормальной физиологии и медицинской физики МГМСУ им. А. И. Евдокимова.

Выводы

1. Дентин и эмаль зубов не являются упруго изотропной средой вследствие симметрии их минеральной составляющей — кристаллов гидроксиапатита.

2. На основе матрицы упругих постоянных установлена выраженная анизотропия коэффициента Пуассона дентина и эмали как кристаллической системы гексагональной сингонии. Максимальное значение коэффициента Пуассона дентина (0,534) более чем в 4 раза превышает минимальное (0,132). Коридор возможных значений коэффициента Пуассона дентина шире, чем таковой у эмали и значительно шире диапазона изменений коэффициента Пуассона известных стоматологических композиционных материалов, что может локально сказываться на качестве реставраций. В данном контексте высказано предположение, что установленная упругая анизотропия модели дентина и эмали как кристаллов с гексагональной симметрией является клинически нежелательным фактором. Максимальное значение коэффициента Пуассона дентина выше значения верхнего предела для коэффициента Пуассона изотропных, в том числе реставрационных материалов, используемых в стоматологии.

3. Более тщательный анализ упругой анизотропии дентина и эмали как минерально-органического комплекса и микронеоднородной гетерофазной системы возможен с привлечением достижений теории текстурированных анизотропных сред (несмотря на то что все призмы минеральных веществ в твердых тканях зуба обладают одинаковым или схожим кристаллическим строением, они отличаются взаимной ориентацией кристаллографических осей). Дальнейшее рассмотрение проблемы должно быть основано на знании характера пространственного распределения кристаллографических осей отдельных кристаллитов минеральных веществ (морфологии) дентина и эмали.

4. Изучение показателей анизотропии дентина и эмали как неоднородной и анизотропной среды имеет практическое значение при изучении прочности и качества реставраций на субмикроскопическом уровне.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотова Л. Ю., Недосеко В. Б., Маршалок О. И., Золотов А. Н., Соловьев С. И., Логунов В. В. Влияние нагрузки на прочностные характеристики комплекса: дентин — фиксирующий цемент — стекловолоконный пост (экспериментальное исследование) // Эндодонтия Today. 2016. № 2. С. 16-18.
- Zolotova L. Yu., Nedoseko V. B., Marshalok O. I., Zolotov A. N., Solov'ev S. I., Logunov V. V. Vliyaniye nagruzki na prochnostnyye harakteristiki kompleksa: dentin — fiksiruyushchij cement — steklovolokonnyj post (ehksperimental'noe issledovanie) // Endodontiya Today. 2016. № 2. S. 16-18.
2. Лебеденко И. Ю., Арутюнов С. Д., Муслев С. А., Усеинов А. С. Исследование наномеханических свойств зубной эмали // Кафедра. 2009. № 32. С. 24-28.
- Lebedenko I. Yu., Arutyunov S. D., Muslov S. A., Useinov A. S. Issledovanie nanomekhanicheskikh svoystv zubnoj ehмали // Kafedra. 2009. № 32. S. 24-28.
3. Лебеденко И. Ю., Арутюнов С. Д., Муслев С. А., Усеинов А. С. Нанотвердость и модуль Юнга зубной эмали // Вестник РУДН, серия «Медицина». 2009. № 4. С. 637-638.
- Lebedenko I. Yu., Arutyunov S. D., Muslov S. A., Useinov A. S. Nanotverdst' i modul' Yunga zubnoj ehмали // Vestnik RUDN, seriya «Medicina». 2009. № 4. S. 637-638.
4. Муслев С. А., Лисовенко Д. С. Упругая анизотропия дентина и эмали // Письма о материалах. 2018. № 8 (3). С. 288-293.
- Muslov S. A., Lisovento D. S. Uprugaya anizotropiya dentina i ehмали // Pis'ma o materialah. 2018. № 8 (3). S. 288-293.
5. Chabrier F, Lloyd CH, Scrimgeour SN. Measurement at low strain rates of the elastic properties of dental polymeric materials. Dent Mater 1999;15:33-8.
6. Nakayama W. T., Hall D. R., Grenoble D. E., Katz J. L. Elastic properties of dental resin restorative materials // J Dent Res. 1974. № 53. P. 1121-1126.
7. Lees S et al. Anisotropy in hard dental tissues // J Biomechanics. 1972. № 5 (6). P. 557-564.
8. Sew Meng Chung et al. Measurement of Poisson's ratio of dental composite restorative materials // Biomaterials. 2004. № 25. P. 2455-2460.
9. Whiting R., Jacobsen P.H. A non-destructive method of evaluating the elastic properties of anterior restorative materials // J Dent Res. 1980. № 59. P. 1978-1984.
10. Li Y. The anisotropic behavior of Poisson's ratio, Young's modulus, and shear modulus in hexagonal materials // Physica Status Solidi (a). 2006. V. 38. Issue 1. P. 171-175.

Поступила 20.09.2018

Координаты для связи с авторами:

127473, г. Москва, ул. Делегатская, д. 20/1

E-mail: muslov@mail.ru

ВСЕ ДЛЯ ДЕНТАЛЬНОЙ ФОТОГРАФИИ
зеркала, контрасторы и другие аксессуары в интернет-магазине

тел.: 8 800 200 6131, e-mail: sale@stomprom.ru, www.stomprom.ru



STOMPROM.RU
интернет-магазин
стоматологического оборудования и материалов