ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/43

КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА ТВЁРДЫХ ТКАНЕЙ ЗУБА

Муслов С.А.¹, Д.С. Лисовенко², Лотков А.И.³

¹ГБОУ ВПО Московский Государственный Медико-Стоматологический Университет
(МГМСУ) им. А.И. Евдокимова Минздрава РФ

²Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

Получена ориентационная зависимость коэффициента Пуассона дентина и эмали зубов на основе матриц упругих постоянных и коэффициентов податливости гексагональных кристаллов, какими являются кристаллы гидроксиапатита дентина и эмали. Результаты вычисления коэффициентов Пуассона дентина и эмали, как кристаллических систем с гексагональной структурой, представлены в виде таблиц и на диаграммах в полярной и декартовой системах координат. Показано, что максимальное значение коэффициента Пуассона дентина (0,54) больше верхнего предела для коэффициента Пуассона изотропных материалов, в том числе известных реставрационных материалов, что в ряде случаев может снижать качество реставраций в микрообъемах. Рассчитаны эффективные упругие характеристики дентина и эмали, в том числе и коэффициент Пуассона с применением различных способов усреднения.

Упругие свойства твердых тканей зуба и гидроксиапатита, как минеральной их составляющей, достаточно часто вызывают интерес у исследователей [1,2]. Для дентина и эмали “технический” коэффициент по литературным данным лежит в интервале 0,29-0,33, например, по результатам ультразвуковых измерений для дентина он равен 0,32, у эмали – 0,28. Однако остаются актуальными и до конца неизученными ряд аспектов этой тематики, в частности, величина коэффициента Пуассона дентина и эмали как анизотропных сред с гексагональной симметрией.

Считается, что дентин представляет собой биоккомпозит и состоит приблизительно на 45-70 % из неорганического материала в форме кристаллов гидроксиапатита. Кристаллы гидроксиапатита расположены между коллагеновыми волокнами и по классу симметрии относятся к гексагональной сингонии. Минеральная основа эмали представлена гексагональными кристаллами гидрокси-, карбонат-, хлор-, фторапатитов, а эмалевые призмы являются основным структурным образованием. Поэтому есть все основания рассматривать дентин и эмаль как анизотропные среды, а это значит, что их упругие свойства описываются матрицей упругих постоянных c_{ij} или коэффициентов податливости s_{ij} и не одним, а двумя коэффициентами Пуассона μ'_{31} и μ'_{32} . По литературным данным значения упругих постоянных дентина и эмали достаточно хорошо известны; поэтому, зная их, можно вычислить коэффициенты податливости и Пуассона дентина и эмали по соответствующим формулам для гексагональных кристаллов. Заслуживает внимания подход, основанный на расчете экстремальных значений коэффициента Пуассона кристаллических сред и построения поверхностей коэффициента в пространстве. Результаты вычисления ориентационных зависимостей коэффициентов Пуассона дентина и эмали, как кристаллических систем с гексагональной структурой, представлены на рис. 1 и рис. 2.

Из данных таблицы и рисунков отчетливо следует выраженное анизотропное поведение коэффициента Пуассона кристаллов дентина и эмали. Его значения в зависимости от направления в пространстве изменяются в весьма широких пределах (в 4,15 раза у дентина и 2,94 раза у эмали). Среднее значение коэффициента Пуассона дентина и эмали получено с

помощью численного интегрирования $\langle \mu'_{ij} \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi \mu'_{ij}(\theta, \psi) \sin \theta d\theta d\psi$: 0,312 для дентина и 0,286 для эмали, что весьма хорошо согласуется с данными ультразвуковых измерений.

Секция 1. Основные принципы и методология физической мезомеханики материалов с иерархической структурой

$\mu_{31}'(\theta)$, a-g: $\psi = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5$

$\mu_{31}'(\psi)$, a-g: $\theta = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5$

Рис. 1. Коэффициент Пуассона μ_{31}' дентина для разных углов Эйлера θ and ψ .

Таблица 1. Экстремальные значения коэффициента Пуассона ($\mu_{\min}$, $\mu_{\max}$) для дентина и эмали, значения коэффициентов Пуассона в частных ориентациях и “коэффициент анизотропии” μ

Материал	$\mu_{\max}$	$\mu_{\min}$	$\mu_{[2\bar{1}\bar{1}0],[0001]}$	$\mu_{[01\bar{1}0],[2\bar{1}\bar{1}0]}$	$\mu_{[0001],[2\bar{1}\bar{1}0]}$	$\mu_{\max} / \mu_{\min}$
Дентин	0,54	0,13	0,16	0,13	0,42	4,15
Эмаль	0,47	0,16	0,19	0,16	0,33	2,94

Рис. 2. Изменение коэффициента Пуассона дентина (а) и эмали (б) в пространстве.

Выполнен расчет эффективных упругих свойств дентина и эмали по VRH как микронеоднородных материалов на основании данных, полученных на монокристаллах (табл. 2).

Таблица 2. Усредненные упругие модули и коэффициент Пуассона дентина и эмали

Материал	K_V	G_V	K_R	G_R	K_H	G_H	E_H	μ_H
Эмаль (E)	62,20	33,22	62,20	30,54	62,20	31,88	81,69	0,28
Дентин (D)	20,11	9,59	20,03	8,21	20,07	8,90	23,26	0,31

Отметим, что приведенные рассчитанные значения μ_H полностью согласуются с известными опытными данными и результатами усреднения $\langle \mu_{ij} \rangle$.

Выводы

1. Дентин и эмаль зубов не являются изотропными средами вследствие симметрии их минеральной составляющей – кристаллов гидроксиапатита.
2. Установлена выраженная анизотропия коэффициента Пуассона дентина и эмали на основе расчетов по формулам упругих постоянных и коэффициентов податливости для гексагональной сингонии. Максимальное значение коэффициента Пуассона дентина (0,534-0,54) более чем в 4 раза (4,15) превышает минимальное (0,13).

Секция 1. Основные принципы и методология физической мезомеханики материалов с иерархической структурой

3. Максимальное значение коэффициента Пуассона дентина оказывается выше значения верхнего предела для коэффициента Пуассона изотропных, в том числе реставрационных материалов, используемых в стоматологии, что может локально сказываться на качестве реставраций.

4. Более тщательный анализ упругой анизотропии твердых тканей зуба как минерально-органического комплекса и микронеоднородной гетерофазной системы возможен с привлечением достижений теории анизотропных сред с кристаллографической текстурой (несмотря на то, что все призмы минеральных веществ в дентине и эмали обладают одинаковым или схожим кристаллическим строением, они отличаются взаимной ориентацией кристаллографических осей). Дальнейший анализ упругой анизотропии твердых тканей зуба должен быть основан на знании закономерностей и особенностей пространственного распределения кристаллографических осей отдел23ьных призм.

5. Значения коэффициента Пуассона эмали принципиально не отличаются от таковых у дентина. Они по-прежнему достаточно велики и свидетельствуют об анизотропии упругих свойств эмали зуба, хотя и в меньшей степени: $\mu_{\max} / \mu_{\min} = 2,94$.

6. Выполненный расчет эффективных коэффициентов Пуассона твердых тканей зуба на основе упругих постоянных и коэффициентов податливости и различных методов усреднения дает результаты, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке по программе фундаментальных исследований по направлению III.23.

Литература

1. Лебеденко И.Ю., Арутюнов С.Д., Муслов С.А., Усеинов А.С. Исследование наномеханических свойств зубной эмали // Кафедра. – № 32. – С. 24-28.
2. J.L. Katz. J. Biomech. 4, 455 (1971). Doi: 10.1016/0021-9290(71)90064-9.