



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В. И. Верещагин

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КЕРАМИЧЕСКИЕ И СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ МАГИСТРАТУРЫ

Рекомендовано Сибирским региональным учебно–методическим центром высшего профессионального образования для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистров 240100 «Химическая технология и биотехнология» и по специальности 240304 «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов»

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2016

УДК 666.3+615.47(075.8)

ББК 35.41:52я73

В31

Авторы:

Верещагин Владимир Иванович — доктор технических наук, заслуженный химик Российской Федерации, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры технологии силикатов и наноматериалов Института физики высоких технологий Томского политехнического университета;

Хабас Тамара Андреевна — доктор технических наук, профессор кафедры технологии силикатов и наноматериалов Института физики высоких технологий Томского политехнического университета;

Кулинич Екатерина Александровна — кандидат технических наук;

Игнатов Виктор Павлович — заведующий лабораторией кафедры технологии силикатов и наноматериалов Института физики высоких технологий Томского политехнического университета.

Рецензенты:

Козик В. В. — доктор технических наук, профессор Томского государственного университета;

Скрипникова Н. К. — доктор технических наук, профессор Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Верещагин, В. И.

В31

Химическая технология. Керамические и стеклокристаллические материалы для медицины : учеб. пособие для магистратуры / В. И. Верещагин [и др.]. — М. : Издательство Юрайт, 2016. — 147 с. — Серия : Университеты России.

ISBN 978-5-9916-6533-9

Серия «Университеты России» позволит высшим учебным заведениям нашей страны использовать в образовательном процессе учебники и учебные пособия по различным дисциплинам, подготовленные преподавателями лучших университетов России и впервые опубликованные в издательствах университетов. Все представленные в этой серии учебники прошли экспертную оценку учебно-методического отдела издательства и публикуются в оригинальной редакции.

В учебном пособии «Химическая технология. Керамические и стеклокристаллические материалы для медицины» хорошо представлены основные современные проблемы применения неорганических материалов в медицине, рассмотрены соответствующие описательные примеры использования стоматологической керамики и керамики для имплантатов, представлены методики химического анализа и статистические данные.

На данный момент ряд данных механических характеристик, приводимых в учебном пособии, устарел. Однако это существенно не влияет на процесс обучения анализа керамических и стеклокристаллических материалов, и произошедшие изменения при необходимости могут быть учтены преподавателями.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для магистров и дипломированных специалистов по программе «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов», а также для аспирантов, научных и инженерно-технических работников.

УДК 666.3+615.47(075.8)

ББК 35.41:52я73



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-9916-6533-9

© Коллектив авторов, 2011

© ООО «Издательство Юрайт», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЕСТЕСТВЕННЫХ КОСТНЫХ ТКАНЯХ И МАТЕРИАЛАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТРАВМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ	8
1.1. Сведения об естественных костных тканях	8
1.1.1. Строение и свойства костей человека	8
1.1.2. Состав, строение и физические свойства зубов человека	16
1.2. Классификация материалов, применяемых в травматологии и ортопедии	21
1.3. Основные требования, предъявляемые к стоматологическим материалам	24
1.4. Свойства материалов, применяемых в стоматологической практике	24
Вопросы для самоконтроля	25
Глава 2. КЕРАМИЧЕСКИЕ И СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ	26
2.1. Стоматологический фарфор	26
2.1.1. Общие понятия о стоматологическом фарфоре	26
2.1.2. Характеристика компонентов фарфоровых масс	27
2.1.3. Основные свойства стоматологического фарфора	29
2.1.4. Пути повышения прочности стоматологического фарфора	35
2.2. Тугоплавкие керамические материалы конструкционного и биомедицинского назначения	36
2.2.1. Общие сведения о керамических материалах и свойствах диоксида циркония	36
2.2.2. Использование ZrO_2 в стоматологии	43
2.3. Стоматологические ситаллы	50
2.3.1. Определение ситалла	50
2.3.2. Получение ситаллизированного материала	50
2.3.3. Свойства ситаллов	52
Вопросы для самоконтроля	53
Глава 3. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ЗУБОПРОТЕЗИРОВАНИЯ И В ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ХИРУРГИИ	55
3.1. Полимеры	55
3.1.1. Общие сведения о полимерах	55
3.1.2. Классификация полимеров	57

3.2. Композиционные материалы	58
3.2.1. Общие сведения о композиционных материалах и их свойствах	58
3.2.2. Классификация композиционных материалов	58
3.2.3. Свойства композиционных материалов	59
3.3. Цементы	61
3.3.1. Общие сведения о цементах и их свойствах	61
3.3.2. Разновидности цементов, применяемых в медицине	62
3.4. Металлы и сплавы, применяемые в ортопедической стоматологии и хирургии.....	67
3.4.1. Классификация сплавов	67
3.4.2. Нержавеющая сталь	70
3.4.3. Кобальтохромовые сплавы	71
3.4.4. Никельхромовые сплавы	72
3.4.5. Сплавы титана	73
Вопросы для самоконтроля.....	80
Глава 4. ИЗДЕЛИЯ И ИМПЛАНТАТЫ ДЛЯ СТОМАТОЛОГИИ	81
4.1. Стандартные искусственные фарфоровые зубы и коронки	81
4.2. Фарфоровые коронки индивидуального изготовления.....	82
4.3. Комбинация фарфора с металлом (металлокерамика)	83
4.3.1. Материалы для облицовки металла	84
4.3.2. Классификация материалов для облицовки металлической коронки.....	85
4.3.3. Подготовка поверхности для нанесения стеклокерамического покрытия	87
4.4. Изделия из ситаллов	89
4.5. Бескаркасная керамика. Свойства и изготовление	91
Вопросы для самоконтроля.....	104
Глава 5. КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ КОСТНОЙ ХИРУРГИИ.....	105
5.1. Свойства покрытий.....	105
5.2. Методы получения неметаллических покрытий медицинского назначения	107
5.3. Методы анализа свойств керамических материалов и покрытий.....	116
5.3.1. Рентгенофазовый анализ.....	116
5.3.2. Определение пористости	119
5.3.3. Определение плотности	119
5.3.4. Определение линейной усадки при обжиге	121
5.3.5. Определение химической растворимости	121

5.3.6. Определение прочности при сжатии	122
5.3.7. Нейтронно-активационный анализ	123
5.3.8. Определение цветовых характеристик стоматологических покрытий.....	124
5.3.9. Инфракрасная спектроскопия (ИК).....	127
5.3.10. Рентгенофлуоресцентный анализ.....	129
5.3.11. Расчет термического коэффициента линейного расширения	131
5.3.12. Определения прочности сцепления металла и керамики	132
5.3.13. Оценка шероховатости поверхности.....	135
5.3.14. Исследование маскирующей способности керамических покрытий	137
5.3.15. Технические требования и биологические исследования керамических материалов для медицинского применения.....	140
Вопросы для самоконтроля.....	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	145

ПРЕДИСЛОВИЕ

При изучении технологий керамических материалов и их физико-химических основ не следует упускать из внимания перспективы настоящего и будущего применения создаваемых материалов, так как это диктует необходимость обеспечения вполне определенных свойств. Медицина – относительно новая область жизнедеятельности человека, в которой находят применение керамические материалы, при этом стоматология – наиболее материалоемкий раздел медицины. Поэтому авторы сочли возможным на примере этой медицинской специальности, а также общей травматологии, продемонстрировать возможности современного материаловедения. Это пособие является первым вводным учебником для студентов и специалистов, не знакомых или мало знакомых с основами химической технологии силикатных и в том числе керамических материалов. Изучая предлагаемое пособие, читатель имеет возможность получить как общее представление о материалах, которые применяются в данном разделе медицины, так и детальное о керамических и стеклокерамических материалах: о свойствах готовых материалов, выборе соответствующего сырья и о методах их изготовления. Цель пособия – познакомить обучающихся с керамическими и стеклокристаллическими материалами. Авторы расширили объем этого материала по сравнению с другими разделами.

Керамические материалы в медицине применяются все еще не достаточно широко, хотя известны их преимущества по сравнению с металлами и пластмассами: биосовместимость и химическая инертность. Проблема состоит в том, что этот более стойкий к воздействию среды и практически не стареющий материал более хрупок и чувствителен к ударно-вибрационным нагрузкам, чем пластические массы и металлы. Повышение механической прочности стеклокристаллических и керамических материалов и изделий из них – одна из задач материаловедения, решением которой занимаются и ученые Томского политехнического университета. Здесь разрабатываются керамические материалы – заменители костной ткани и стеклокристаллические покрытия зубных протезов. В пособии приводятся некоторые данные по этим разработкам.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших разделов ортопедической стоматологии и имплантологии является материаловедение.

Материаловедение – наука о строении и свойствах материалов. Основная задача этой науки – установление связей между составом, структурой различных материалов и их физическими свойствами: механическими, тепловыми, электрическими и т. д.

Стоматологическое материаловедение является прикладным разделом науки, направленной на создание новых и совершенствование многих известных материалов, изучение их технологических и клинических свойств, которые имеют отношение к стоматологической практике.

При изготовлении имплантатов применяются различные материалы – керамика, ситаллы, их комбинации с металлом (металлокерамика), полимеры, пластмассы, керамеры, цементы.

Керамика – старейший искусственный материал. Как и в других сферах деятельности человека, керамику в медицине использовали по-разному: и в качестве сосудов для лекарств, и в качестве искусственных зубов, обнаруженных в египетских мумиях. Уже в XVIII в. были популярны зубные имплантаты, а в 1982 г. появились публикации о применении сульфата кальция для заполнения зубных дефектов. Позднее сообщалось об использовании фосфата кальция для пломбирования зубов и фарфора для изготовления зубов и коронок. Постепенно интерес к керамическим материалам возрастал благодаря уникальному сочетанию необходимых для применения в медицине свойств: химической инертности, биосовместимости, высокой коррозионной стойкости и стойкости к износу, прочности при сжатии, твердости и низкой ползучести. Однако по сравнению с металлами керамика имеет малую прочность при растяжении, повышенную хрупкость и чувствительность к механическим и термическим ударным нагрузкам. Поэтому в настоящее время все большее применение находят комбинации металла и керамики, композиционные полимерно-керамические материалы, а также новые керамические материалы, позволяющие существенно расширить область применения керамики в медицине.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЕСТЕСТВЕННЫХ КОСТНЫХ ТКАНЯХ И МАТЕРИАЛАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТРАВМАТОЛОГИИ И ОРТОПЕДИИ

1.1. Сведения об естественных костных тканях

1.1.1. *Строение и свойства костей человека*

Кость – это живая ткань, состоящая из органического компонента, обеспечивающего возможность ее развития и адаптации к изменениям окружающей среды, и неорганического матрикса. Жесткость кости определяется ее минеральным составом, представленным, в основном, кальцием, фосфором в виде многофазных кальций-фосфатных соединений с включениями магния и других микроэлементов (Sr, Sn, Co, Cr, Fe, Cu и пр.). Она находится в динамическом равновесии за счет протекания единовременных процессов образования и резорбции костной ткани [1].

Все многообразие функций, выполняемых костным скелетом, можно объединить в две большие группы – механические функции и биологические функции. К механическим функциям относятся: защитная, опорная, локомоторная и рессорная. Защитная функция скелета состоит в том, что он образует стенки ряда полостей (грудной полости, полости черепа, полости таза, позвоночного канала) и является, таким образом, надежной защитой для располагающихся в этих полостях жизненно важных органов.

Опорная функция скелета заключается в том, что он является опорой для мышц и внутренних органов, которые, фиксируясь к костям, удерживаются в своем положении.

Локомоторная функция скелета проявляется в том, что кости – это рычаги, которые приводятся в движение мышцами (через нервную систему), обуславливая различные двигательные акты: бег, ходьбу, прыжки и т. п.

Рессорная функция скелета обусловлена его способностью смягчать толчки и сотрясения (благодаря сводчатому строению стопы, хрящевым прокладкам между костями в местах их соединения, связкам внутри соединений костей, изгибам позвоночника и др.).

Биологические функции скелета связаны с участием его в обмене веществ, прежде всего в минеральном обмене. Кости – это депо минеральных солей кальция и фосфора. 99 % всего кальция находится в костях.

Кроме того, кости скелета принимают участие и в кроветворении. Находящийся в них красный костный мозг вырабатывает эритроциты, зернистые формы лейкоцитов и кровяные пластинки. При этом в кроветворной функции участвует не только костный мозг, но и кости в целом, так что усиленная мышечная деятельность, оказывая влияние на кость, способствует и улучшению кроветворения.

Основной структурно-функциональной единицей скелета является кость. Каждая кость в организме человека – это живой, пластичный, изменяющийся орган. Кость как орган состоит из нескольких тканей, имеет свою определенную морфологическую структуру и функционирует как часть целостного организма (рис. 1.1 и 1.2). Основной тканью в кости является костная ткань, кроме нее имеется плотная соединительная ткань, образующая, например, оболочку кости, покрывающую ее снаружи, рыхлая соединительная ткань, одевающая сосуды, хрящевая, покрывающая концы костей или образующая зоны роста, ретикулярная ткань – основа костного мозга и элементы нервной ткани – нервы и нервные окончания. Каждая кость имеет определенную форму, величину, строение и находится в связи с соседними костями.

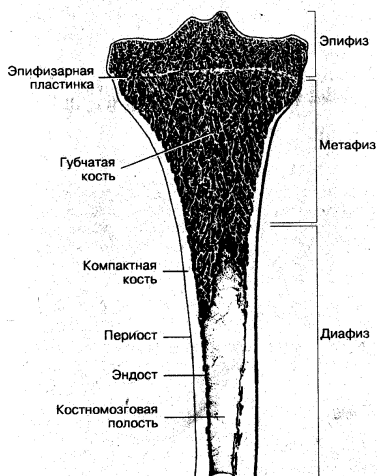


Рис. 1.1. Большеберцовая трубчатая кость (Hees H., Sinowatz F., 1992)

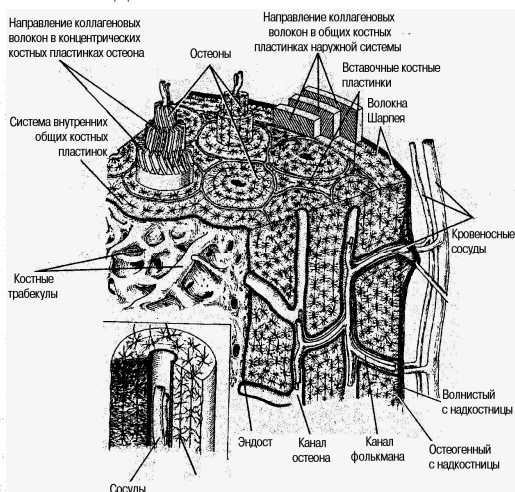


Рис. 1.2. Компактная часть трубчатой кости (Kees R.G., Kardon R. H., 1979)

В состав скелета входит 206 костей – 85 парных и 36 непарных. Кости составляют примерно 18 % веса тела. Кость состоит из кортикальной (сплошной) и губчатой (трабекулярной) типов ткани, каждый из которых обладает определенной трехмерной структурой и, как следствие, различными механическими свойствами.

Сформированная кортикальная кость состоит из плотно расположенных концентрических (остеонов, гаверсовых систем с сосудами), интерстициальных и параллельных пластинок.

Зрелая губчатая кость представляет собой скопление перегородок и спикул костных пластинок, т. е. костных перекладин.

Губчатая кость на 70 % состоит из мягких тканей, большей частью костного мозга, а кортикальная кость на 95 % минерализована. Кортикальная кость в 10–20 раз плотнее губчатой, что делает ее более приспособленной для постановки имплантов.

Макроскопически эта кость смотрится как решетка из сот, в которых расположены кровеносные элементы. Кость состоит на 65...70 % из кристаллических солей (по весу), прежде всего в форме гидроксиапатита, остальные 30...35 % – это органическая матрица. Органическая матрица, прежде всего, состоит из коллагена типа 1 (90...95 %), перемежающихся с неколлагеновыми протеинами, такими как остеопонтин, остеонекнин и другими факторами роста [1].

Форма костей. Кость – структурно-функциональная единица скелета человека, орган, состоящий из костной ткани. Каждая из костей, разнообразных по величине и форме, занимает определенное положение в скелете. Различают трубчатые, губчатые, плоские, смешанные, воздухоносные группы костей. Трубчатая кость. Средняя часть трубчатой кости – тело кости, диафиз, имеет удлиненную, цилиндрическую или трехгранную форму. Утолщенные концы длинной кости, эпифизы, имеют суставные поверхности, служащие для соединения с соседними костями посредством суставов. Суставные поверхности покрыты суставным хрящом. Участки перехода диафиза в эпифизы называют метафизами. Трубчатые кости составляют конечности скелета и выполняют функции рычагов при движениях. Выделяют трубчатые кости длинные (плечевая, бедренная, кости предплечья и голени) и короткие (пястные, плюсневые, фаланги пальцев).

Губчатая кость. Губчатые кости образуют подвижные части скелета – соединения между трубчатыми костями (кости запястья, предплюсны). Губчатые кости имеют форму неправильного куба или многогранника.

Плоская кость. Плоские кости участвуют в образовании полостей тела, выполняют функцию механической защиты (кости крыши черепа, тазовые кости, грудина, ребра), имеют обширные поверхности для прикрепления мышц.

Смешанная кость. Смешанные кости – это кости разнообразной сложной формы, не относящиеся к трубчатым, губчатым или плоским костям. Например, тело позвонка по структуре и форме относится к губчатым костям, дуга, отростки позвонка – к плоским костям.

Воздухоносные кости. Кости, имеющие в теле полость, выстланную слизистой оболочкой и заполненную воздухом. К ним относятся некоторые кости черепа: лобная, клиновидная, решетчатая, верхняя челюсть.

На поверхностях каждой кости имеются неровности: бугры, бугорки, гребни, отростки. Здесь начинаются или прикрепляются мышцы и их сухожилия, фасции, связки. Эти возвышения, выступающие над поверхностью кости, называют апофизами.

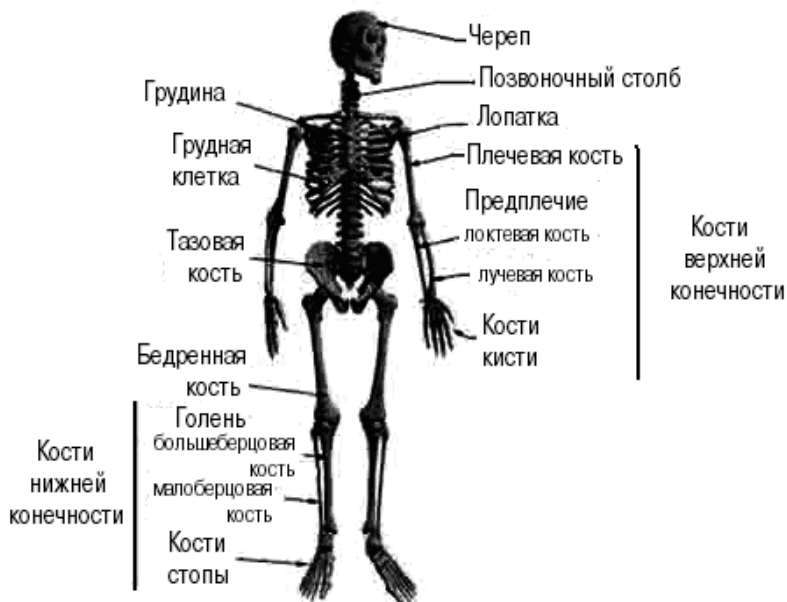


Рис. 1.3. Строение скелета человека

На участке, где мышца прикрепляется своей мясистой частью, определяются углубления: ямы, ямочки. Поверхности кости ограничены краями. На некоторых костях имеются бороздки, в которых проходят нерв или кровеносный сосуд. В местах прохождения через кость сосуда или нерва образуются канал, каналец, щель или вырезка. На поверхности каждой кости, особенно с внутренней ее стороны, могут быть видны точечные питательные отверстия, уходящие в глубь кости. Закругленный эпифиз трубчатой кости, отграниченный от тела кости сужением – шейкой, называют головкой трубчатой кости. Головка имеет гладкую суставную поверхность, покрытую суставным хрящом, и образует сустав с другой костью. Суставная поверхность может быть выпуклой, вогнутой или иметь форму возвышения (мыщелок).

Все пространство внутри кости заполнено костным мозгом. На рис. 1.3 представлено изображение скелета человека.

Химический состав костей. Костная ткань состоит на 60 % из минеральных веществ (доминирует – гидроксиапатит), 30 % – органических субстанций (оссеина) и 10 % – воды, находящейся в связанном и свободном состоянии. Около 85 % воды находится в органической матрице вокруг волокон коллагена и основного вещества и в гидратированной оболочке, окружающей костные кристаллы ГА. Другие 15 % находятся в каналах и полостях, окружающих костную оболочку, и доставляют питательные вещества тканям кости. Вода придает упругие свойства костной ткани. В компактной кости содержится около 10 % воды, а в губчатой около 5–15 %. Биохимическая структура костной ткани представлена на рис. 1.4.

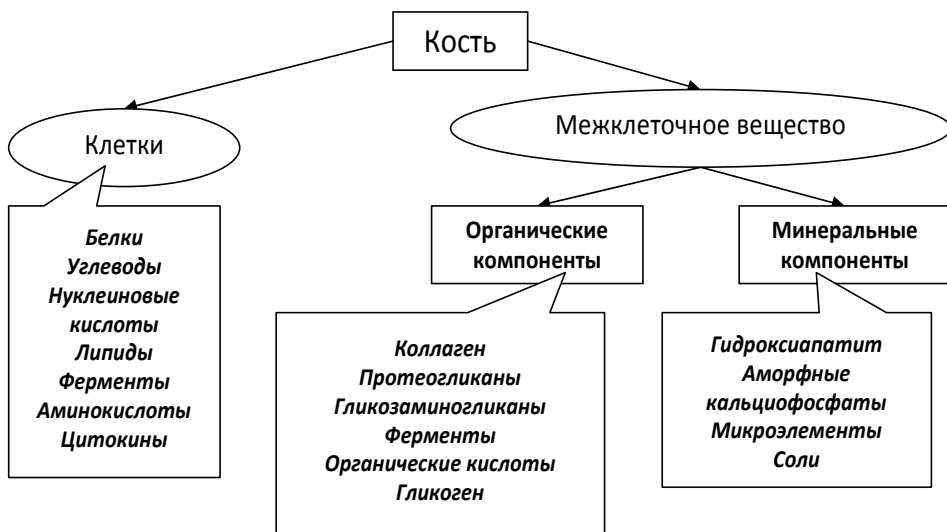


Рис. 1.4. Биохимическая структура костной ткани

Неорганическая часть в значительном количестве содержит преимущественно два химических элемента – кальций и фосфор, составляющие 35 % и 50 % соответственно, они придают кости его плотную консистенцию. Кость служит резервуаром основных минералов в теле, в частности кальция (98 %), фосфора (85 %), магния (50 %) и натрия (45 %). Остальные 15 % приходятся на бикарбонаты, цитраты, фториды, различные соли и микроэлементы. Кости включают: 60 % $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 5,9 % – CaCO_3 и 1,4 % – $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)$. В кортикальном слое кости определяется только один тип гидроксиапатита (ГА), распределение веществ составляет CaO – 37,66 %, P_2O_5 – 28,58 %, MgO – 0,72 %, Na_2O – 0,99 %, K_2O – 0,07 %, SrO – 0,04 %, CO_2 – 3,48 %, F – 0,07 %, Cl – 0,08 % или всего 71,54 %, остальное – связанная вода и органика.

Наиболее важными микроэлементами являются Cu, Zn, Sr, Ba, Be, Al, Mo, Au, Mn, Fe, Si и др. Считается, что дефицит или увеличение количества этих соединений может играть важную роль в процессах обновления кристаллической решетки костных минералов, определяет ее пространственную структуру, от которой во многом зависят прочностные характеристики костной ткани [1].

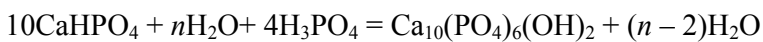
Гидроксиапатит (гидроксилапатит, трикальцийфосфат, ГА). В 1926 г. Дийонг и Гросс, Мехмель, используя рентгенодифракционный анализ, установили, что гидроксиапатит является главным неорганическим компонентом костей, эмали зубов и дентина. Термин «апатит» ввел Вернер в 1788 г. для фосфорсодержащих минералов.

Около 50...60 % от массы всей костной ткани приходится на минеральное вещество, преимущественно состоящее из кристаллов и (в меньшей степени) коллоидных растворов ГА, имеющих формулу:



Нерастворимые фосфаты кальция присутствуют в кости в виде стабильных (кристаллы гидроксиапатита) и лабильных (аморфных) фосфатов. Последние покрывают поверхность ГА.

Кристаллы гидроксиапатита имеют преимущественно гексагональную форму, построенную из колонок Ca и атомов O, принадлежащих фосфатным группам, которые образуют стенки каналов, идущих параллельно гексагональным осям. В костной ткани размеры элементарной ячейки около $20 \times 5 \times 1,5$ нм, длинная ось ее ориентирована параллельно осям коллагеновых фибрилл, кристаллы сгруппированы в виде стержней (диаметром около 50 А, длиной – 2000 А) и соединяются с коллагеном через остеоонектин. Такая структура придает материалу высокую прочность на растяжение и сжатие, приближающуюся к прочности мягких марок сталей. Однако в отличие от последней, кости намного легче, более эластичны, способны к регенерации в процессе роста и заживления. Между тем между синтетическим и биологическим апатитами существует принципиальное различие. Теоретически синтез ГА может протекать в живом организме по достаточно простой реакции, которую можно описать следующим образом:



Аморфный кальциофосфат. Гидроксиапатит представляет лишь часть минеральной фазы костной ткани. Другая часть представлена аморфным фосфорнокислым кальцием, являющимся прямым продуктом деятельности остеобластов и остеоцитов. Предполагается, что существуют два механизма образования аморфных кальциофосфатов. Один реализуется через аккумуляцию данного вещества внутри клетки в виде

гранул, которые затем секретируются в межклеточное пространство. Другой путь связан с переходом свободного или связанного с органическими компонентами кальция через мембрану в межклеточное пространство. Образовавшийся аморфный кальций является источником ионов Са для ГА. Между ними существует динамическое равновесие, зависящее от возраста, пола, содержания витамина Д, микроэлементов, гормонов и других факторов. При этом фосфорнокислый кальций является более растворимой и биологически активной субстанцией, чем ГА.

Около 80...90 % всех фосфатов содержится в костях, которые постоянно контактируют с фосфатами, циркулирующими с кровью, лимфоцитами и другими тканевыми жидкостями, формирующими естественные буферные системы организма. Следует подчеркнуть, что соотношение кальция и фосфора в ГА равно 1,62, а в трикальций фосфате – около 1,5.

Микроэлементы. Характерная особенность микроэлементов заключается в том, что они в чрезвычайно низких концентрациях выступают в роли катализаторов, или активаторов ферментов, гормонов, витаминов и других биоактивных молекул. В костной ткани обнаружено свыше 30 микроэлементов. Магний и цинк являются активаторами щелочной фосфатазы. Рахитоподобные состояния развиваются при поступлении в организм избытка бериллия, алюминия, марганца и стронция. Стронций конкурирует с кальцием за место в кристаллах ГА. В губчатой кости стронция в 3 раза больше, чем в компактной. Встраиваться в структуру ГА может магний, барий и кобальт.

Органическая часть костного матрикса. Органическая часть – коллаген (98 %) и неколлагеновые белки (2 %), клетки, в частности, остеонектин, остеокальцин, протеогликаны, сиалопротеины, мофрogene-тические белки, органические кислоты.

Коллаген является основным строительным белком костной ткани, определяющий ее конструкцию, прочность, упругость, жесткость, устойчивость к нагрузкам и деформациям. Коллаген – сложный белок, состоящий из трех спиралей. Длина спиралей около 300 нм, диаметр 1,5 нм. Все известные типы коллагена содержат регионы с повторяющимися последовательностями из трех аминокислот с глицином в третьем положении и пролином или гидроксипролином – во втором. В настоящее время известно около 17 видов коллагенов. В костной ткани около 90-95 % составляет коллаген I-типа.

Клеточный состав кости. Кость состоит из четырех видов кости: остеобласты, остеокласты, остециты и клетки, являющиеся прокладкой кости. *Остеобласты* представляют собой крупные клетки овальной формы, содержащие все компоненты, подобно клеткам других тканей. Физиологическая задача остеобластов заключается в построении кост-

ной ткани. Остеобласты вырабатывают большое количество органических веществ, в частности они обладают мощным аппаратом белкового синтеза. Остеобласты – эти полностью дифференцированные клетки секретируют коллаген типа 1, так и неколлагеновые протеины костной органической матрицы. Остеобласты должны также регулировать минерализацию этой матрицы. *Остеокласты* – крупные многоядерные клетки округлой формы. Их основная функция заключается в резорбции (растворении) кости. В отличие от остеобластов в них содержится не одно крупное ядро, а несколько мелких. Оболочка, ограничивающая остеокласт, в местах соприкосновения с костными белками имеет волнистое строение. Отдельные впадины внедряются глубоко в клетку. У костного края в месте соприкосновения с остеокластом наблюдается характерная волнистая изъеденная поверхность. Остеокласты в отличие от других костных клеток, которые имеют локальное происхождение, возникают из слияния мононуклеарных предшественников клеток, которые возникают в кроветворных тканях. Остеоциты – замурованные в минеральном веществе, слабо функционирующие остеобласты. В костной ткани постоянно происходит процесс превращения остеобластов в остеоциты.

Клетки, плоские и веретенообразные, являющиеся прокладкой кости, покрывают неактивные костные поверхности. О функции этих клеток известно очень мало, однако некоторые считают, что они являются предшественниками остеобластов. Считается, что некоторые клетки (например, клетки остеопровинтеры) запрограммированы, чтобы стать костными клетками, а их происхождение считается одновременным с примитивными мезенхимными эмбриональными клетками.

Особое специфическое физико-химическое соединение органических и неорганических веществ в костях и обуславливает их основные свойства – упругость, эластичность, прочность и твердость.

Эластичность кости связана с органическими веществами, а твердость и прочность – с неорганическими.

О механических свойствах кости можно судить на основании их прочности на сжатие, растяжение, разрыв, излом и т. п. (табл. 1.1).

На сжатие кость в десять раз прочнее хряща, в пять раз прочнее железобетона.

На растяжение компактное вещество кости выдерживает нагрузку до 10...12 кг на 1 мм², а на сжатие – 12...16 кг.

По сопротивлению на разрыв кость в продольном направлении превышает сопротивление дуба и равна сопротивлению чугуна. Так, например, для раздробления бедренной кости давлением нужно приблизительно 3 тыс. кг, для раздробления большеберцовой кости не менее 4 тыс. кг.

Таблица 1.1

Некоторые механические характеристики костной системы

Ткань	Направление нагрузки	Модуль упругости (ГПа)	Прочность на растяжение (МПа)	Прочность на сжатие
Бедро	Продольное	17,2	121	167
Большеберцовая кость	Продольное	18,1	140	159
Малоберцовая кость	Продольное	18,6	146	129
Плечевая кость	Продольное	17,2	130	132
Лучевая кость	Продольное	18,6	149	114
Локтевая кость	Продольное	18	148	117
Шейные позвонки	Продольное	0,23	3,1	10
Поясничные позвонки	Продольное	0,16	3,7	5
Губчатая кость	Продольное	0,09	1,2	1,9
Кости черепа	Тангенциальное	–	25	–
Кости черепа	Радиальное	–	–	97

Органическое вещество кости – оссеин – выдерживает нагрузку на растяжение 1,5 кг на 1 мм², на сжатие – 2,5 кг, прочность же сухожилий составляет 7 кг на 1 мм². Несмотря на значительную прочность, кость весьма пластичный орган и может перестраиваться на протяжении всей жизни человека.

Наличие в костях солей кальция делает кости менее «прозрачными» для лучей Рентгена, чем окружающие их мягкие ткани. Вследствие неодинакового строения костей, присутствия в них более или менее толстого слоя компактного коркового вещества, а внутри от него губчатого вещества, можно увидеть и различить кости на рентгенограммах.

Компактное вещество образует на рентгенограмме плотную «тень» в виде светлых полос большей или меньшей ширины, а губчатое – сетеподобный рисунок, на котором ячейки имеют вид темных пятен различных размеров.

1.1.2. Состав, строение и физические свойства зубов человека

Оптические свойства эмали и дентина зубов человека обусловлены их топографией и морфологическими особенностями. **Эмаль** покрывает всю поверхность коронки зуба и придает ему прозрачность и естественный блеск.

Эмаль постоянных зубов содержит 95...97 % неорганических веществ, 0,5...2 % органических веществ, до 3 % воды. Рассчитанные теоретически (на основе удельного веса компонентов) и определенные ме-

тодом микрорадиографического исследования, объемные соотношения составляющих следующие: в среднем 86...87 % минеральных веществ, 2 % органических и 6..12 % воды. Химический состав (соотношение элементов в эмали) зависит прежде всего от степени зрелости зуба, а также от геофизических и других условий жизни человека [2].

Издавна предполагалось, что главным элементом структуры минерализованных тканей является кальций-фосфорное соединение гидроксипатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. Основанием для этого заключения послужили данные о процентном содержании различных компонентов. Большую часть – 37...39 % массы всей эмали – составляет кальций, 17...19 % – фосфор. Величины Ca и P рассчитаны по массе золы. Кроме того, в эмали содержится около 20 микроэлементов, которые могут находиться в межкристаллических пространствах либо в соединении с органическими веществами. Более 1,0 мг/кг сухой массы занимают F, S, Zn, Sn; от 0,1 до 1,0 мг/кг – Ca, Zr, Mn, Cu, Se, Br, Sb, Ru, Ni, Mg, Cd; менее 0,1 мг/кг – Ti, V, Cs, Bi. Основные минеральные компоненты эмали – кальций и фосфор – содержатся в виде кристаллических апатитоподобных структур, которые относятся к гексагональной системе кристаллов.

Химический анализ показывает, что основные кристаллы зубной эмали – это частично замещенные гидроксипатиты, и их свойства в значительной степени зависят от наличия и положения OH-групп. Структурно они помещаются в каналы, образованные ионами Ca, и образуют так называемую связанную воду [2, 3].

Молодые кристаллы апатита в эмали чаще всего образуют ленты толщиной около 15 нм. Зрелые кристаллы гидроксипатита имеют размеры в среднем 160 нм в длину и 20 нм в ширину и образуют гексагонально-призматические структуры. В эмали объем кристалла в 200 раз больше, чем в дентине. Кроме призматической формы, имеются кристаллы в форме иглы, ланцета, балки, штанги. Плотные упакованные кристаллы образуют эмалевые призмы диаметром 2...10 мкм, и на поперечном срезе эмали отчетливо видно, что головка каждой предыдущей призмы вклинивается между отростками соседних (рис. 1.5).

Покрытый эмалью **дентин** составляет основную массу коронки и корня зуба. Зрелый дентин содержит 70...75 % неорганического вещества, 18 % органики и 10...12 % воды. Основные составные элементы неорганической части дентина – кальций и фосфор. От общей массы дентина кальций занимает 26,7 %, фосфор – 13,6 %. На рис. 1.6 можно видеть высокую однородность эмали (слева) и неоднородное строение дентина (справа).

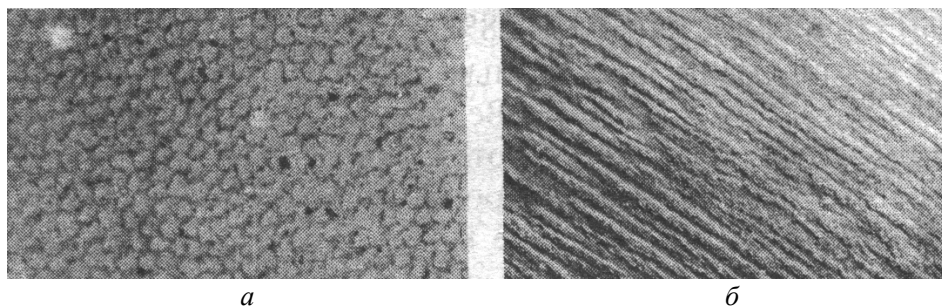


Рис. 1.5. Шлиф зуба поперечный (а) и по ходу эмалевых призм (б).

Метод интерференционного контраста. Увеличение – 2000.

Высокая плотность упаковки призм в эмали обеспечивает однородность структуры и ее прозрачность

Физические свойства. Наиболее важная, ведущая функция зуба – жевательная. Твердые ткани – эмаль и дентин – предназначены для откусывания, измельчения, растирания пищи. Их устойчивость к действию механических факторов обеспечивается особенностями состава и морфологии: строением и взаимным положением частиц. Элементы структуры эмали – это кристаллы, плотно упакованные в эмалевые призмы. Призмы собраны в пучки, которые изгибаются вдоль длинной оси. Это придает особую механическую устойчивость эмали.

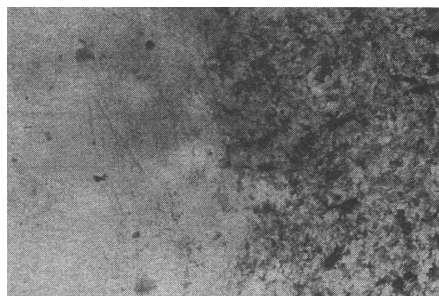


Рис. 1.6. Шлиф зуба в области эмалево-дентинного соединения.

ТЭМ. Увеличение 1000

Дентин имеет в своем составе значительное количество органики (до 20 %). Он менее хрупок, чем эмаль, и поэтому служит своеобразным амортизатором. Более того, истирание эмали в процессе жизнедеятельности компенсируется уплотнением дентина, который начинает обеспечивать функцию жевания. Жевательную функцию эмали можно описать прямыми или косвенными показателями. В первую очередь это микротвердость, которая снижается в зонах с пониженным содержанием кальция, фосфора, микроэлементов, особенно фтора. Увеличение их ко-