

Лекция 4

Механические свойства твердых тел и биологических тканей

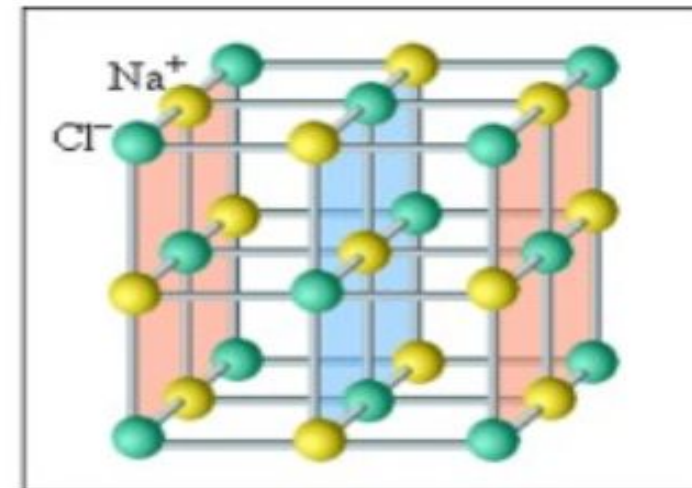
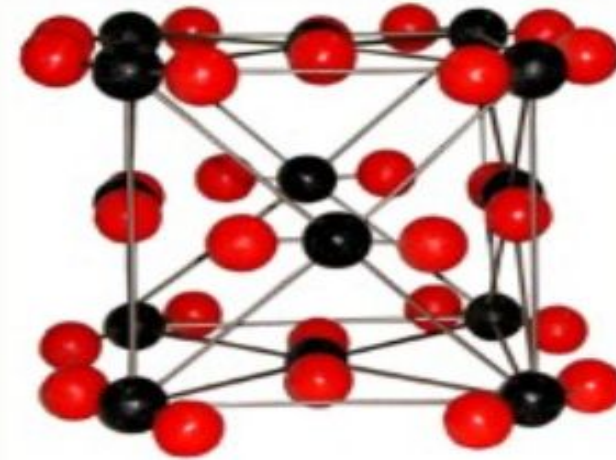
Содержание:

- 1) Кристаллические и аморфные тела
- 2) Полимеры
- 3) Деформации. Виды деформаций
- 4) Характеристики деформаций
- 5) Закон Гука
- 6) Моделирование механических свойств твердых тел
- 7) Модель Максвелла, модель Кельвина-Фойхта
- 8) Пассивные механические свойства биологических тканей

Кристаллические тела

Кристаллы - твердые тела, атомы или молекулы которых занимают определенные, упорядоченные положения в пространстве

- В кристаллических телах частицы располагаются в строгом порядке, образуя пространственные периодически повторяющиеся структуры во всем объеме тела (**дальний порядок**)
- Для наглядного представления таких структур используются пространственные кристаллические решетки, в узлах которых располагаются центры атомов или молекул данного вещества.
- Чаще всего кристаллическая решетка строится из ионов (положительно и отрицательно заряженных) атомов, которые входят в состав молекулы данного вещества.

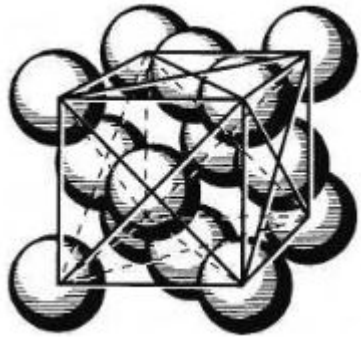


Большинство кристаллических тел — поликристаллы, так как они состоят из множества сросшихся кристалликов. Одиночные кристаллы — монокристаллы имеют правильную геометрическую форму, и их свойства различны по разным направлениям (анизотропия).

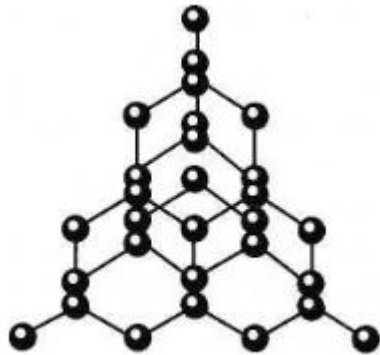
Правильность внешней формы твердых (кристаллических) тел обусловлена тем, что частицы (атомы, молекулы), из которых эти тела состоят, расположены относительно друг друга в определенном порядке, на строго определенных расстояниях друг от друга (см. гл. 2).

Вследствие теплового движения расстояния между частицами несколько меняются, так как они совершают колебания около определенных точек — положений равновесия частиц. Именно эти точки (они называются узлами) и расположены в определенном порядке.

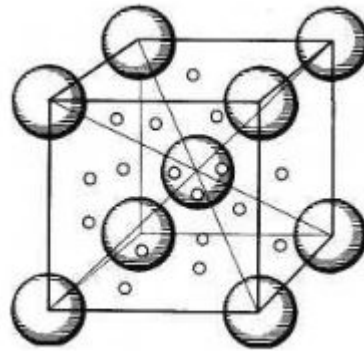
Существует четыре типа кристаллов: молекулярные, ковалентные (или атомные), ионные и металлические. Во всех типах кристаллов образующие их частицы (молекулы, атомы, ионы) располагаются таким образом, что их энергия оказывается минимальной. При таком расположении частиц внутри кристалла они образуют устойчивую систему. Тип кристалла определяется характером взаимодействия атомов и молекул, образующих кристалл.



Молекулярный кристалл аргона



Ковалентный (атомный) кристалл алмаза



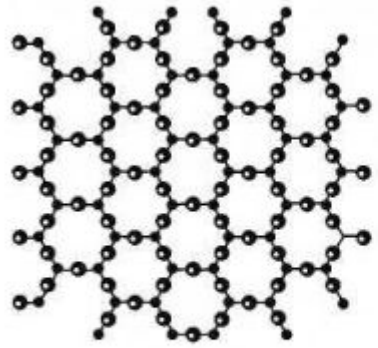
Элементарная ячейка ионного кристалла натрия



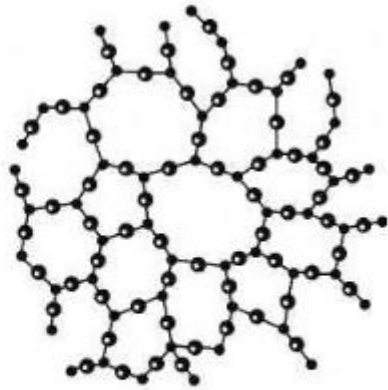
Аморфные тела

Тепловые, электрические и оптические свойства аморфных тел одинаковы по всем направлениям: аморфные тела изотропны. Признаком аморфного тела является неправильная форма поверхности при изломе. Кристаллы же при изломе дают плоские (или ступенчатые) поверхности.

В аморфных телах слагающие его частицы не имеют определенного расположения по всему объему тела, как в кристалле. В расположении атомов (молекул) аморфного тела наблюдается беспорядок. Только ближние атомы — соседи располагаются в относительном порядке. Но строгой повторяемости во всех направлениях одного и того же элемента структуры, которая характерна для кристаллов, в аморфных телах нет. Наблюдается лишь так называемый ближний порядок.



a)



b)

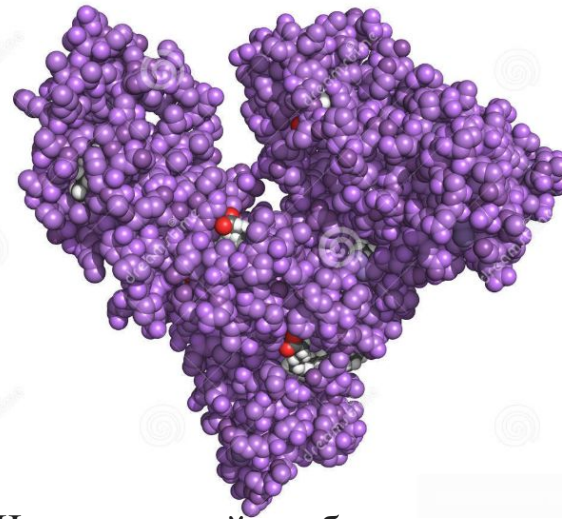
Упорядоченному расположению атомов кристаллических тел соответствует минимум потенциальной энергии, когда атомы сближаются на минимально возможные расстояния. Отсутствие дальнего порядка в расположении атомов аморфных тел приводит к тому, что вещество в аморфном состоянии имеет меньшую плотность, чем в кристаллическом. И этому состоянию соответствует большая потенциальная энергия взаимодействия. Вот почему аморфное состояние неустойчиво и вещество из аморфного состояния переходит в кристаллическое. Течение процессов в природе направлено в сторону уменьшения энергии.

Полимеры

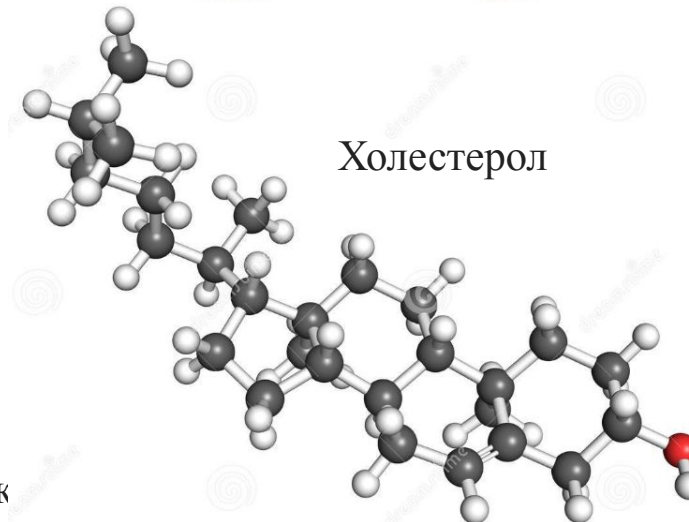
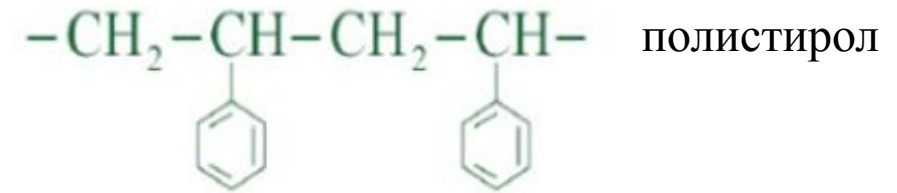
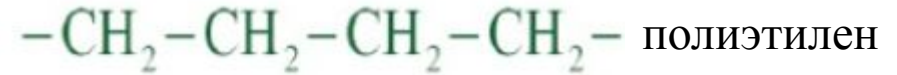
Полимерами называют вещества, молекулы которых представляют собой длинные цепи, составленные из большого числа атомов или атомных группировок, соединенных химическими связями.

К полимерным материалам относят почти все живые и растительные материалы, такие, как шерсть, кожа, рог, волос, шелк, хлопок, натуральный каучук и т.п., а также всякого рода синтетические материалы - синтетический каучук, пластмассы, волокна и др.

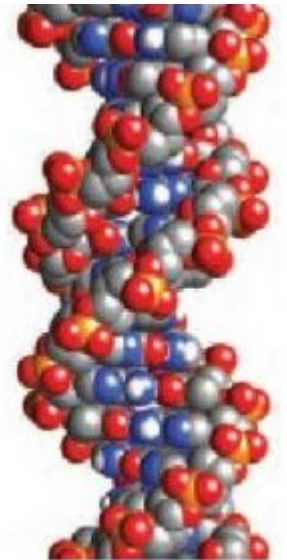
Большинство природных полимерных материалов представляет собой белковые вещества; простые белки - альбумин, глобулин; сложные - казеин, кератины и коллаген.



Человеческий альбумин сыворотки со стеариновой кислотой

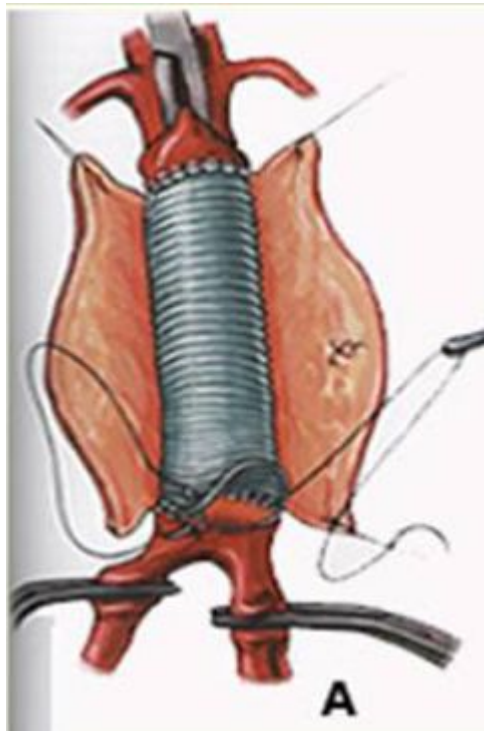


Холестерол



ДНК

Из полимеров типа полиэтилена, поливинилхлорида и др., легко обрабатываемых давлением, изготавливают различные медицинские инструменты и приспособления.



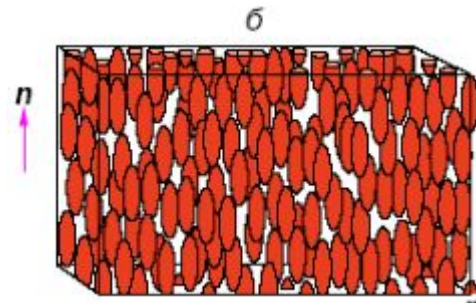
Протезирование аорты

Тефлон, капрон и лавсан, милар, силастиковый полимер обладают высокой химической стойкостью, вследствие чего их используют при изготовлении протезов внутренних частей организма (кровеносных сосудов, клапанов сердца, сухожилий, вживляемых глазных линз и т.п.). Раствор полимера поливинилпирролидона - хороший заменитель кровяной плазмы.

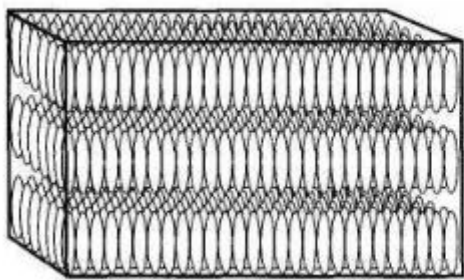


Жидкие кристаллы

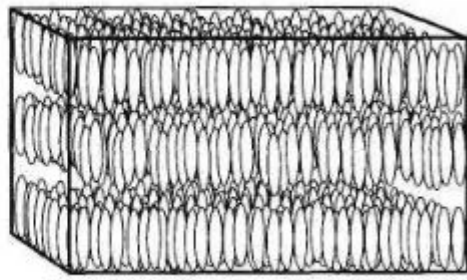
Молекулы жидких кристаллов — это молекулы органических соединений, имеющие вытянутую сигарообразную форму. Строение их таково, что концы молекул очень слабо взаимодействуют друг с другом. Боковые же поверхности взаимодействуют достаточно сильно и могут прочно удерживать молекулы в едином ансамбле, в то время как концевые связи разорваны.



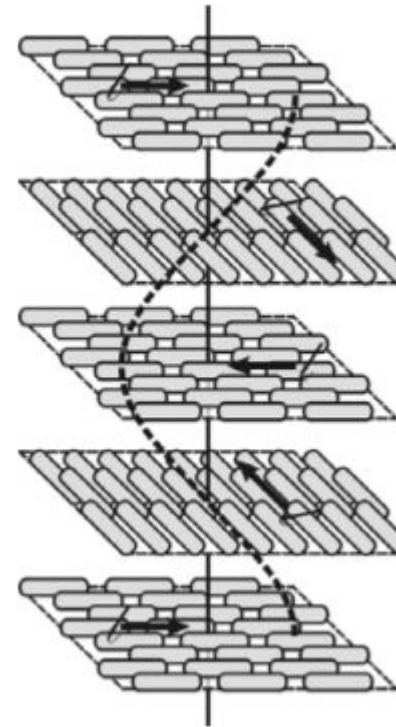
Нематические жидкие кристаллы



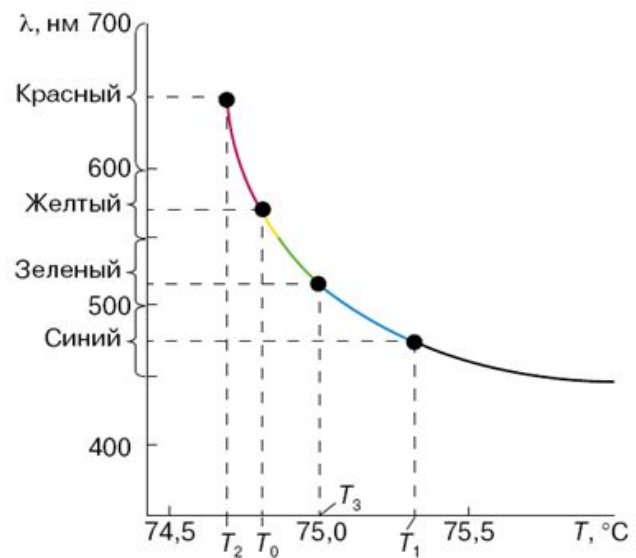
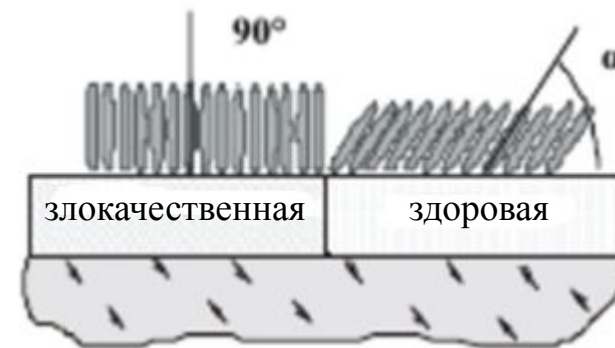
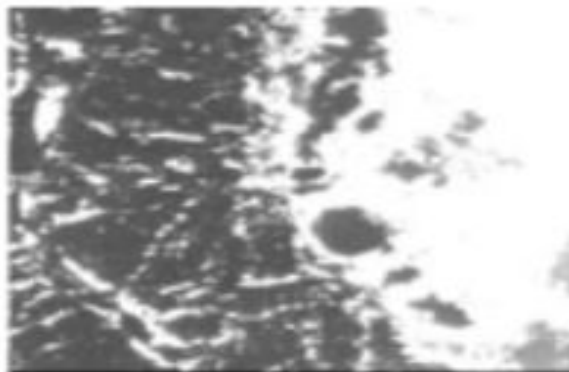
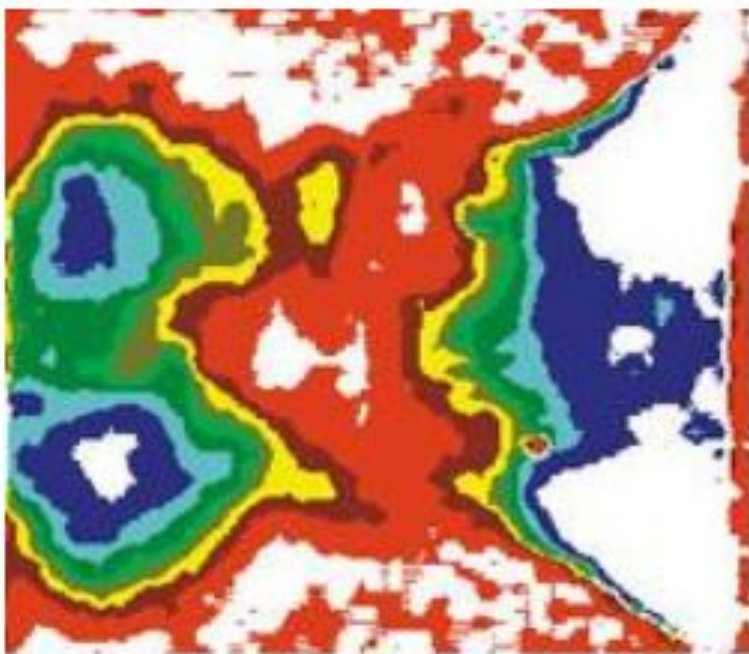
Смектические жидкие кристаллы



Холестерические жидкие кристаллы (холестерики)



С изменением температуры углы, характеризующие повороты осей молекул от слоя к слою, изменяются. Это приводит к изменению условий отражения света от кристалла. В результате окраска кристалла при отражении белого света от холестерического кристалла зависит от температуры. При фиксированной температуре данное вещество имеет определенный цвет.

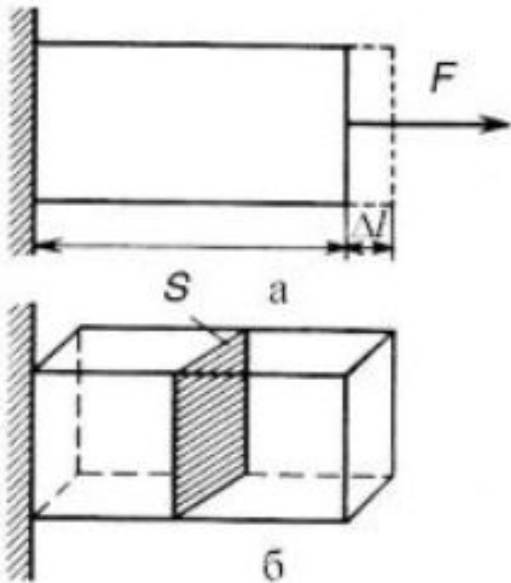


Фотография границы рака прямой кишки (слева) и окружающей здоровой ткани (справа), продекорированные слоем ЖК

Деформация растяжения (сжатия)

Изменение взаимного расположения точек тела, которое приводит к изменению его формы и размеров, называют *деформацией*.

В твердых телах деформацию называют *упругой*, если после прекращения действия силы она исчезает. Если же деформация сохраняется и после прекращения внешнего воздействия, то ее называют *пластической*. Промежуточный случай, т.е. неполное исчезновение деформации, принято называть *упругопластической* деформацией.



Δl – абсолютное удлинение

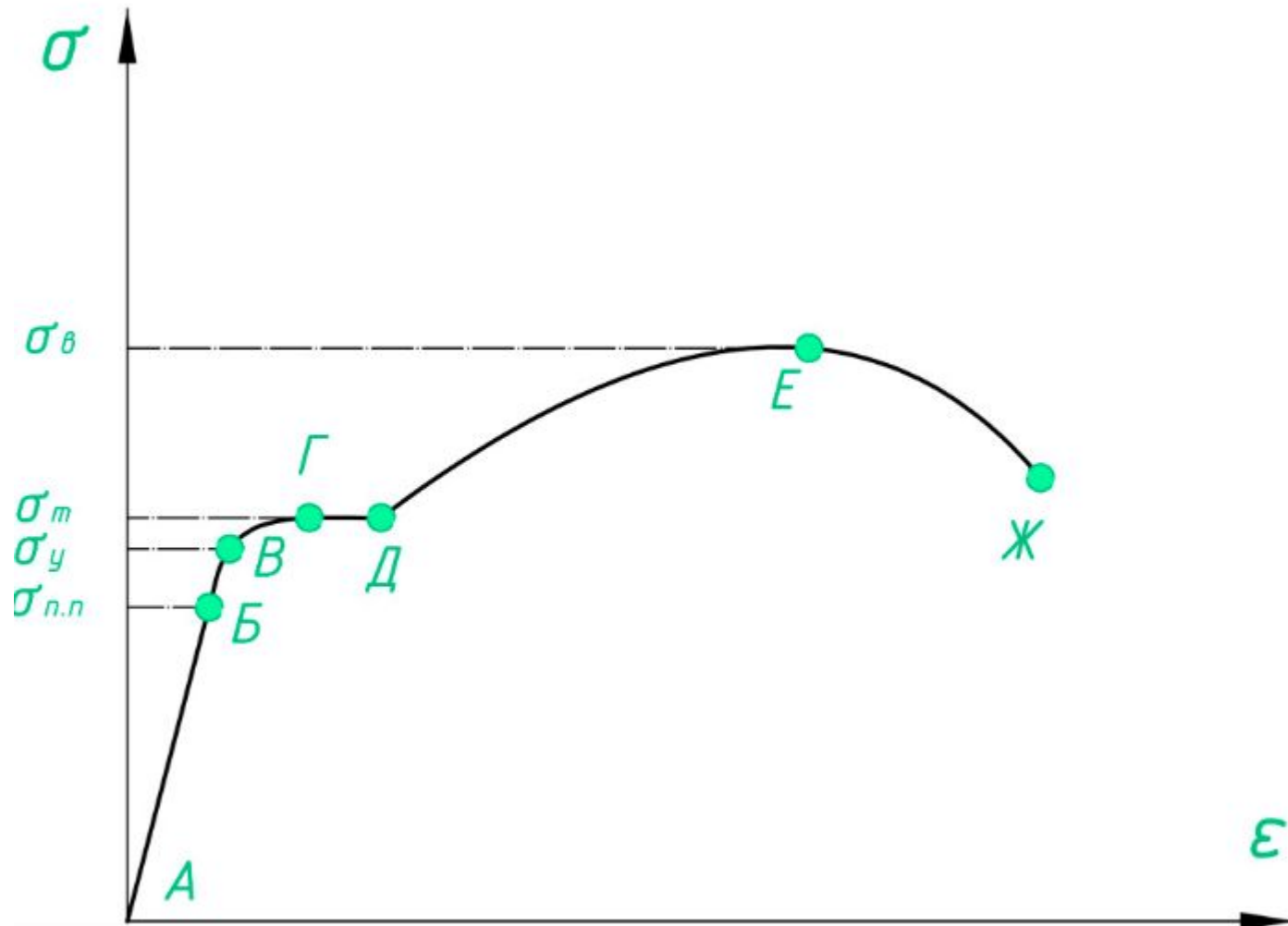
$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ – относительное удлинение

$\sigma = \frac{F}{S}$ – напряжение

$\sigma = E\varepsilon$ – закон Гука

E – модуль Юнга, $[E] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$

Диаграмма растяжения (сжатия)



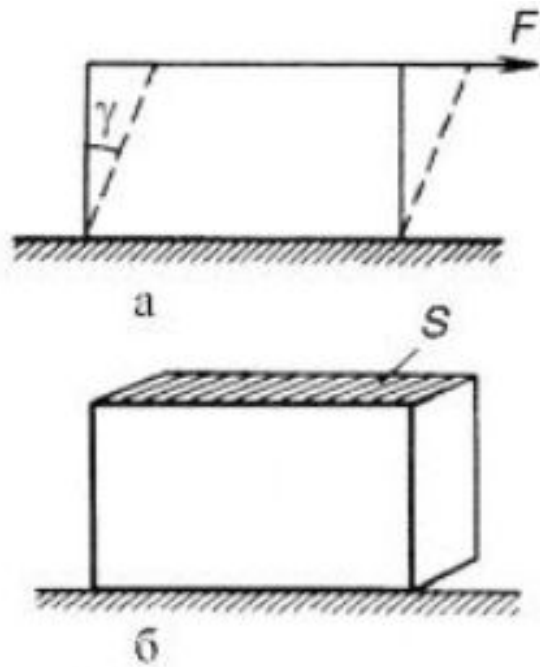
АБ – участок упругих деформаций

т. В – предел упругости, характеризующий то максимальное напряжение, при котором еще не имеют места остаточные деформации

ГД – предел текучести – соответствует напряжению, начиная с которого деформация возрастает без увеличения напряжения

т. Е – предел прочности

Деформация сдвига



Сила, касательная к одной из граней прямоугольного параллелепипеда, вызывает его деформацию, превращая в косоугольный параллелепипед.

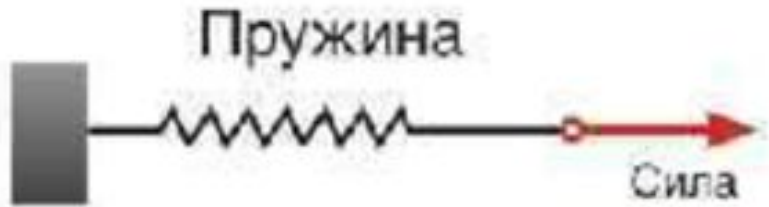
γ — угол сдвига

$\operatorname{tg}\gamma$ — относительный сдвиг

$\tau = \frac{F}{S}$ — касательное напряжение

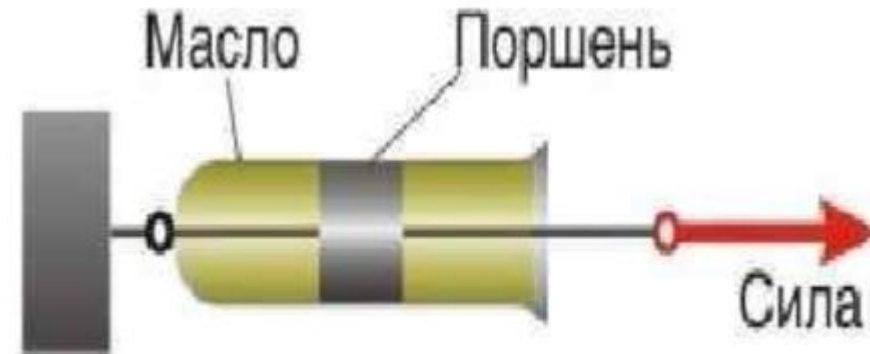
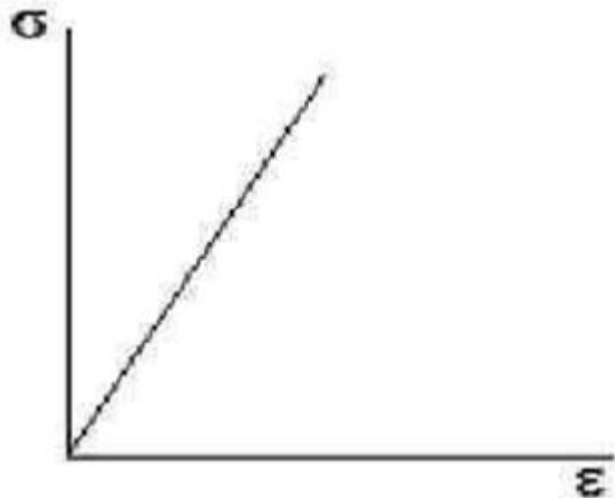
$\tau = G\gamma$ — закон Гука G — модуль Юнга, $[G] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$

Моделирование механических свойств твёрдых тел



Модель упругого тела (упругой деформации)

$$\sigma = E\varepsilon$$



Модель вязкого тела

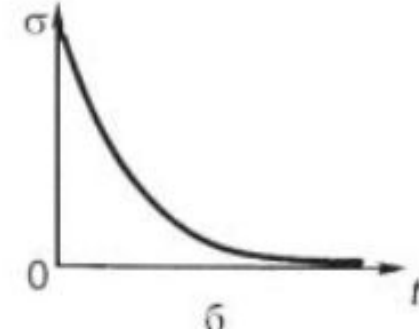
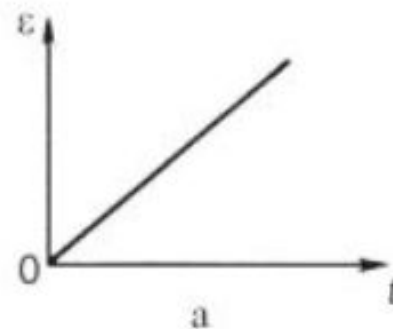
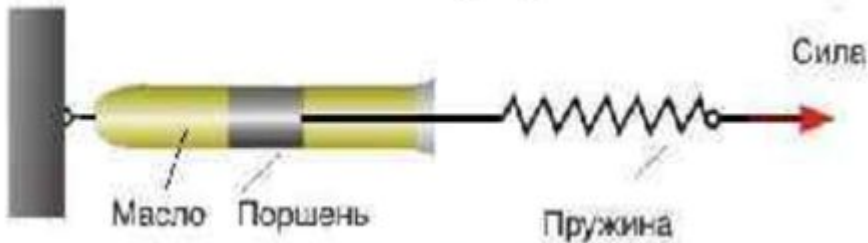
$$F_{\text{сопр}} = r \frac{dx}{dt}$$

$$F_{\text{сопр}} \rightarrow \sigma, r \rightarrow \eta, x \rightarrow \varepsilon$$

Тогда связь между скоростью и вязкой деформацией:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Модель Максвелла



Упругая часть из закона Гука: $\varepsilon_{\text{упр}} = \frac{\sigma}{E}$

Скорость упругой деформации: $\frac{d\varepsilon_{\text{упр}}}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$

Вязкая деформация: $\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$

Скорость вязкой деформации: $\frac{d\varepsilon_{\text{в}}}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}$

Скорость общей деформации модели Максвелла:

~~$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta}$$~~

1. $\sigma = \text{const}, \frac{d\sigma}{dt} = 0$ (к модели приложена постоянная сила):

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad d\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} dt \quad \int_0^{\varepsilon} d\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} \int_0^t dt$$

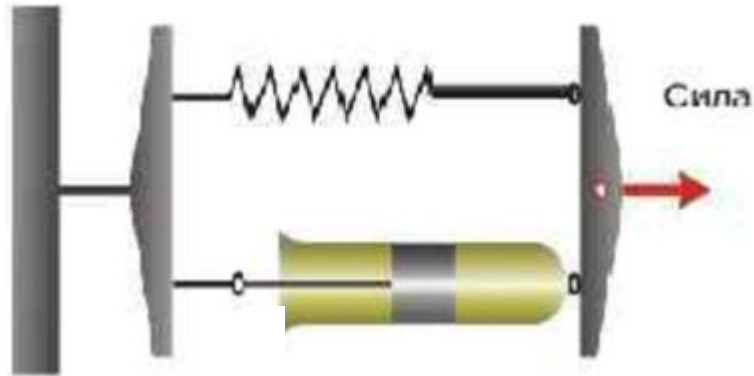
$\varepsilon = \frac{\sigma}{\eta} t$ — ползучесть (рис. а)

2. $\varepsilon = 0, \frac{d\varepsilon}{dt} = 0$ (поддерживается постоянная деформация):

$$0 = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma}{\eta} \quad \frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} dt$$

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} \frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} \int_0^t dt \quad \ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = -\frac{E}{\eta} t \quad \sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E}{\eta} t} \text{ (рис. б)}$$

Модель Кельвина-Фойхта



$$\sigma = \sigma_{\text{упр}} + \sigma_{\text{вяз}}$$

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$dt = \eta \frac{d\varepsilon}{\sigma - E\varepsilon}$$

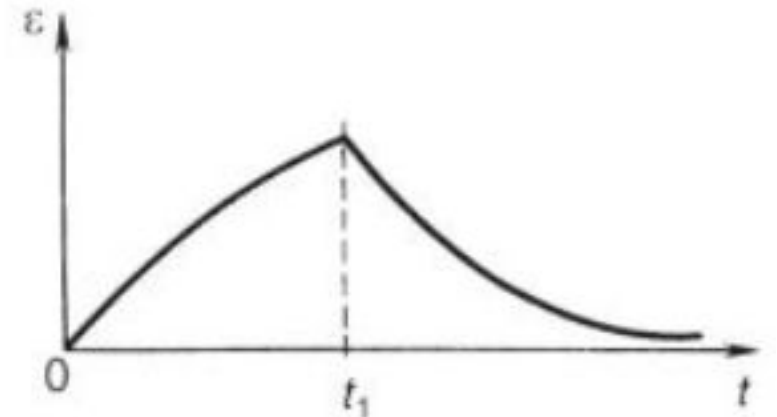
$$\int_0^t dt = \int_0^\varepsilon \eta \frac{d\varepsilon}{\sigma - E\varepsilon}$$

$$t = -\frac{\eta}{E} (\ln|\sigma - E\varepsilon| - \ln\sigma) = -\frac{\eta}{E} \ln\left(\frac{\sigma - E\varepsilon}{\sigma}\right)$$

$$\ln\left(\frac{\sigma - E\varepsilon}{\sigma}\right) = -\frac{E}{\eta} t$$

$$\frac{\sigma - E\varepsilon}{\sigma} = e^{-\frac{E}{\eta} t}$$

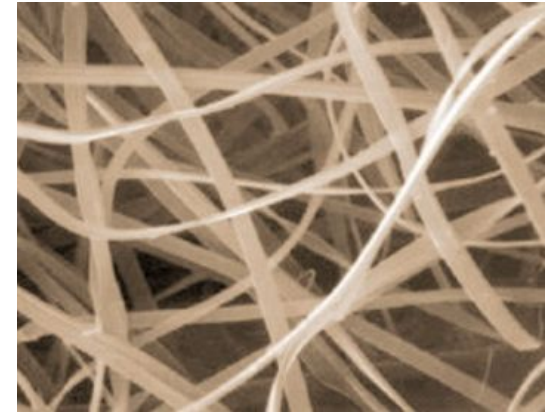
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} (1 - e^{-\frac{E}{\eta} t})$$



Механические свойства биологических тканей

В биомеханике принято выделять следующие разделы:

1. Биомеханика биологических материалов и систем. Изучает особенности строения, деформационные и прочностные свойства, а также разрушение различных тканей и систем.
2. Биомеханика управления и регулирования биологических систем. Исследует механические процессы в биологических системах.
3. Биомеханика заменителей биологических тканей. Изучает вопросы создания искусственных материалов, заменяющих биологические ткани и системы (искусственное сердце, почки, системы искусственного кровообращения и тому подобное).
4. Медицинская биомеханика. Связана с восстановлением трудоспособности людей. Пока наибольшее развитие получило восстановление опорно-двигательной системы.

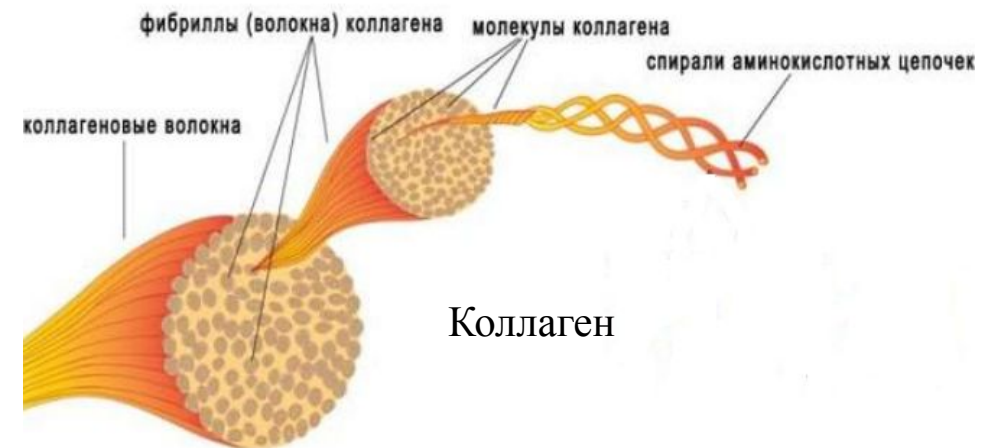


Эластин

Основу биотканей составляют эластин, коллаген и связующее вещество.

Эластин – упругий белок. Он очень сильно растягивается (выдерживает относительное удлинение, достигающее 200-300 %), обладает ярко выраженными нелинейными механическими свойствами и переменным модулем упругости, значение которого изменяется от 10^5 Па до $6 \cdot 10^5$ Па.

Чистый коллаген – группа волокнистых белков – растягивается меньше (предельное относительное удлинение не превышает 10 %) и, так же как эластин, обнаруживает нелинейные механические свойства. Его модуль упругости достигает значений от 10^7 Па до 10^8 Па. Коллаген – главный компонент сухожилий, связок и дермы (соединительной части кожи).



Коллаген

Механические свойства костной ткани



Компактное
вещество
костной ткани.



Имеет пластинчатое строение,
напоминающее систему вставленных
друг в друга цилиндров

Губчатое
вещество
костной ткани.



Образовано очень тонкими костными
перекладинами, ориентированными
параллельно линиям основных
напряжений

Химический состав костей

Органические
вещества
30%

*Белок – коллаген,
оссеин; углеводы
(полисахариды);
лимонная кислота,
ферменты*

Придают костям
**упругость,
гибкость,
мягкость**

Вода
10%

Неорганические
(минеральные)
вещества **60%**

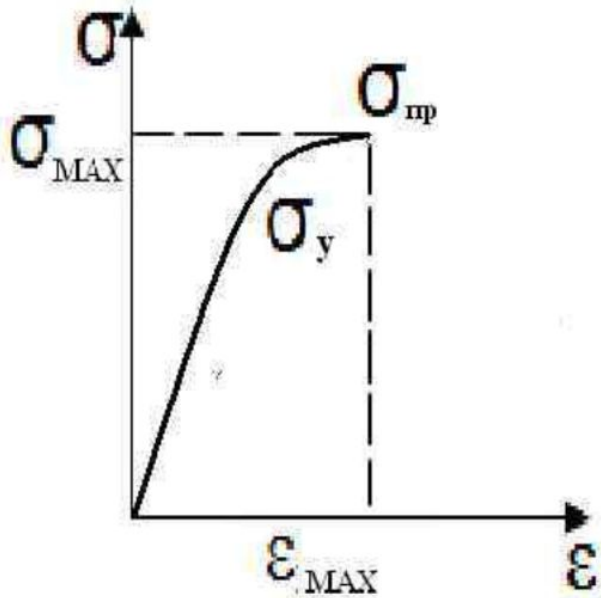
*Соли кальция (99% от
всего кальция в орга-
низме), соли фосфора,
магния, многие
микроэлементы*

Придают костям
**прочность и
твердость**



Механические свойства костной ткани

Кости, как строительный материал скелета, работают на сжатие, растяжение, кручение или на изгиб



При небольших напряжениях (до 10 МПа) для компактной костной ткани справедлив закон Гука. При достижении предела прочности кость подвергается разрушению (10-150 МПа).

Минеральное содержимое кости обеспечивает быструю деформацию, а полимерная часть (коллаген) определяет ползучесть

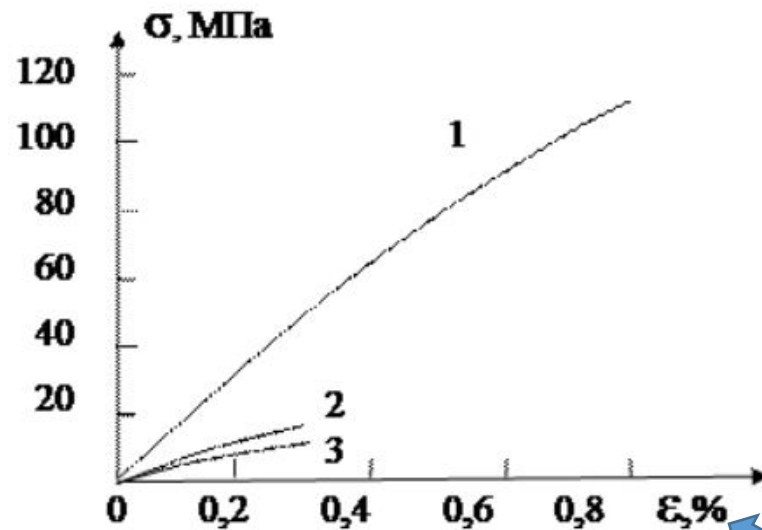
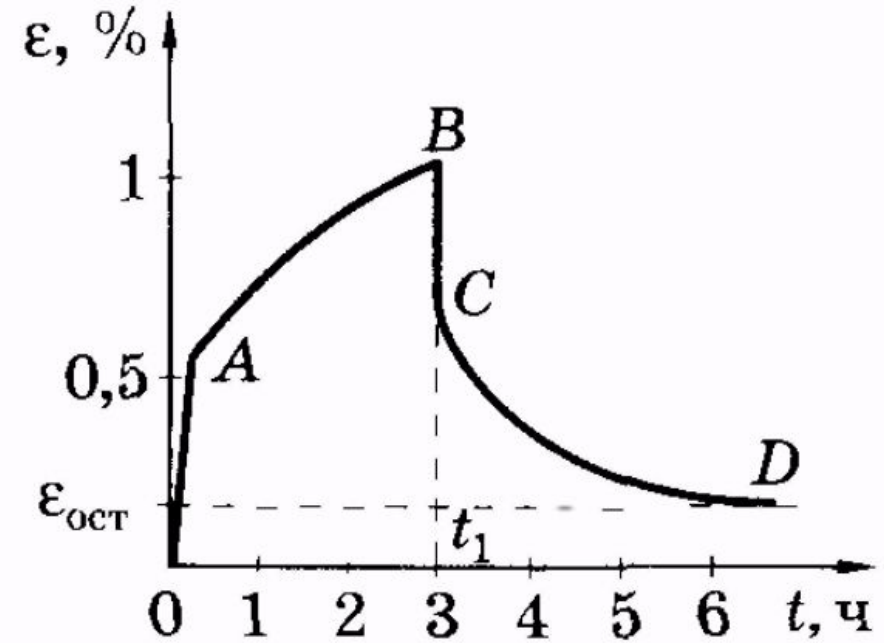


Рис. 13.

Диаграммы растяжений компактной костной ткани человека вдоль разных направлений: 1 – в продольном (x), 2- и 3- в поперечных (y и z) направлениях



Для компактного вещества костной характерна анизотропия упругих и прочностных свойств при различных видах деформаций, а также нелинейная зависимость между механическим напряжением и величиной деформации.

Механические свойства костной ткани (модель Зинера)

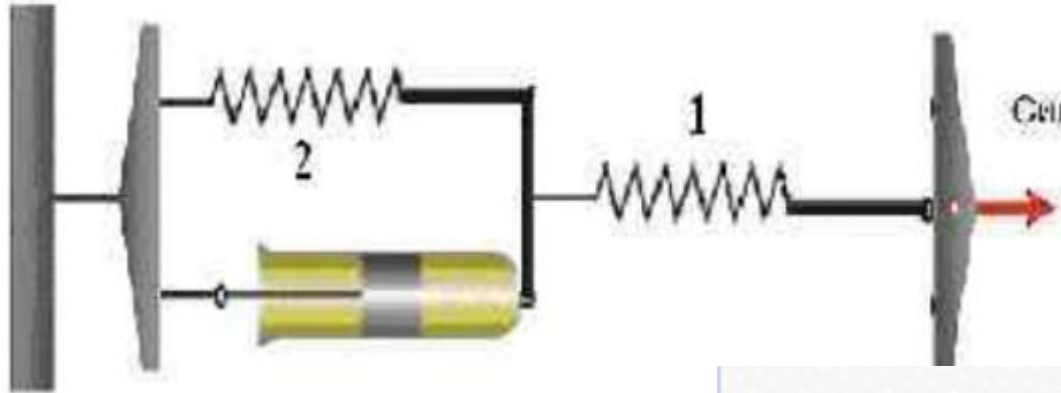


Рис.1

При действии постоянной нагрузки мгновенно растягивается пружина 1 (ОА).

Затем вытягивается поршень (АВ).

После прекращения нагрузки происходит быстрое сжатие пружины 1 (ВС).

Пружина 2 втягивает поршень в прежнее положение (СD)

В данной модели не предусматривается остаточная деформация.

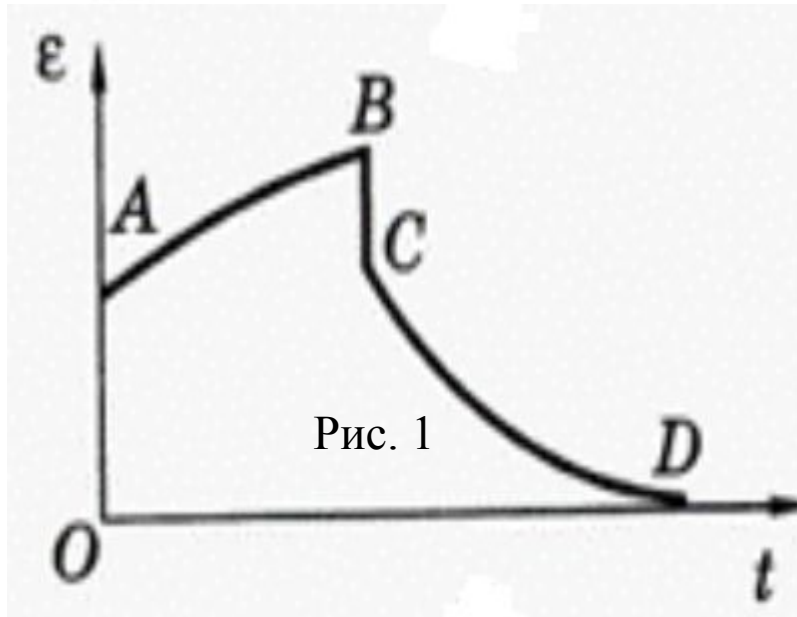


Рис. 1

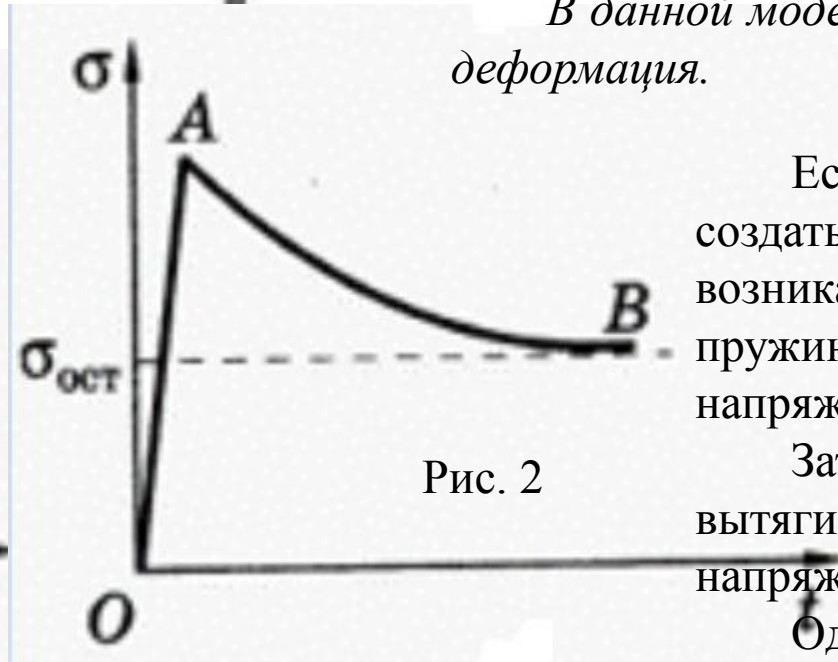


Рис. 2

Рис.2

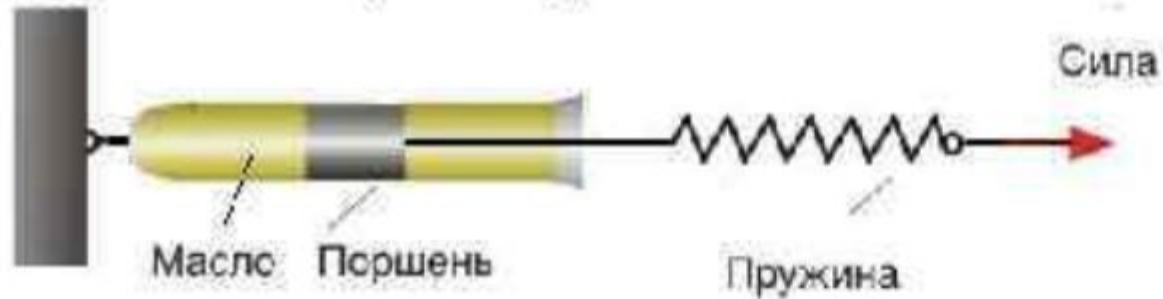
Если в кости (или в модели) быстро создать постоянную деформацию, то резко возникает и напряжение (ОА – растяжение пружины 1 и возникновение в ней напряжения).

Затем эта пружина будет сокращаться, вытягивая поршень и растягивая пружину 2, напряжение в системе будет убывать.

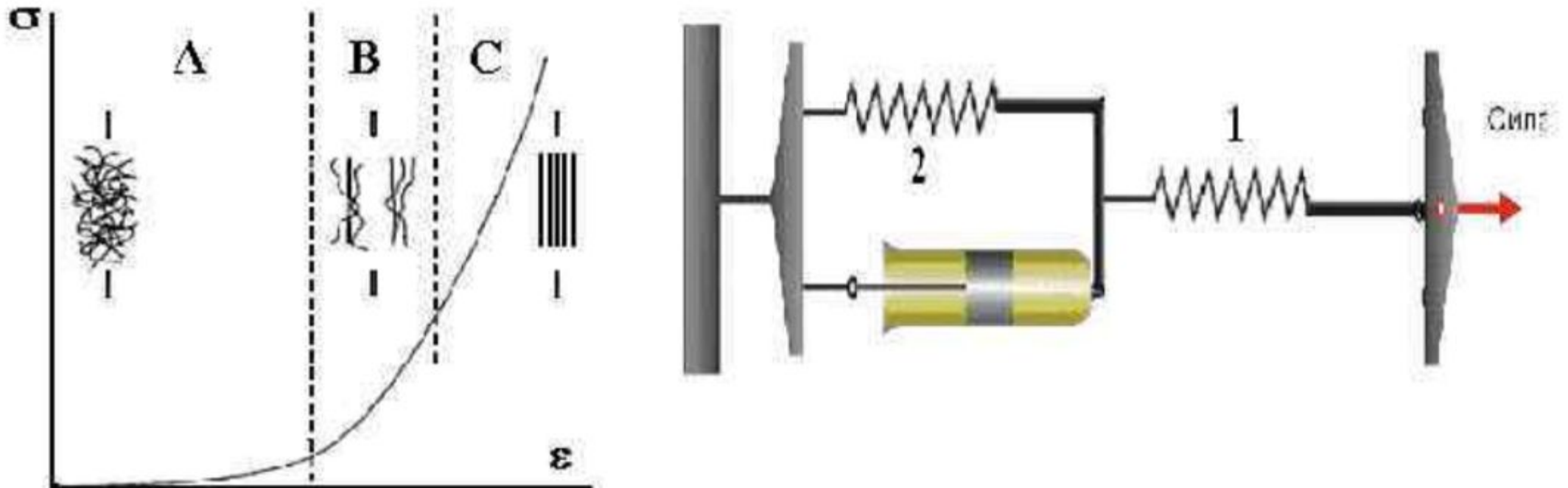
Однако даже спустя длительное время сохранится остаточное напряжение.

Механические свойства мышечной ткани




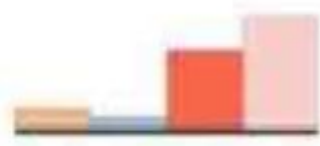
- Гладкие мышцы – модель Максвелла







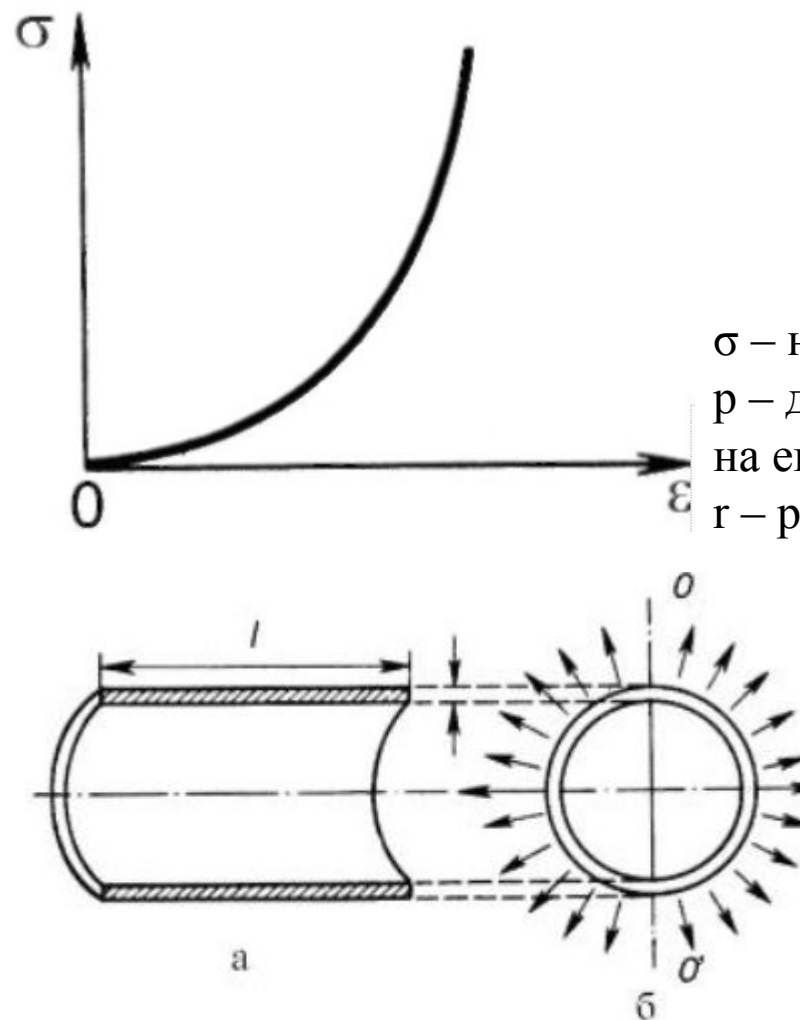
- Скелетная мышца- хорошо описываются моделью для костной ткани



Механические свойства стенки кровеносных сосудов

Тип сосуда	диаметр толщина	Состав стенки
 Артерия		
 Вена		

 эндотелиальная ткань	 гладкие мышцы
 эластин	 коллаген



Уравнение Ламе:

$$\sigma = \frac{pr}{h}$$

σ – напряжение стенки сосуда
 p – давление изнутри сосуда
 на его стенки
 r – радиус сосуда

