

Подготовила: Байтемирова Айдана

# Твёрдое тело и деформация

# Твёрдое тело

- **Твёрдое тело** — это одно из четырёх [агрегатных состояний вещества](#), отличающееся от других агрегатных состояний ([жидкости](#), [газов](#), [плазмы](#)) стабильностью формы и характером [теплового движения атомов](#), совершающих малые [колебания](#) около положений равновесия<sup>[1]</sup>.
- Различают [кристаллические](#) и [аморфные](#) твёрдые тела. Раздел [физики](#), изучающий состав и внутреннюю структуру твёрдых тел, называется [физикой твёрдого тела](#). То, как твёрдое тело меняет форму при воздействиях и движении, изучается отдельной дисциплиной — [механикой твёрдого \(деформируемого\) тела](#). Движением абсолютно твёрдого тела занимается третья наука — [кинематика твёрдого тела](#).
- Технические приспособления, созданные человеком, используют различные свойства твёрдого тела. В прошлом твёрдое тело применялось как конструкционный материал и в основе употребления лежали непосредственно ощутимые механические свойства как то [твёрдость](#), [масса](#), [пластичность](#), [упругость](#), [хрупкость](#). В современном мире применение твёрдого тела основывается на физических свойствах, которые зачастую обнаруживаются только при лабораторных исследованиях.

# Модель расположения атомов в кристалле твёрдого тела



# План:

- 1 Описание
- 2 Классификация твёрдых веществ
- 3 Историческая справка
- 4 Фазовые переходы
- 5 Физические свойства
  - 5.1 Механические свойства
  - 5.2 Тепловые свойства
  - 5.3 Электрические и магнитные свойства
- 6 Идеализации твёрдого тела в науках
  - 6.1 В теоретической механике
  - 6.2 В теории упругости
  - 6.3 В теории пластичности

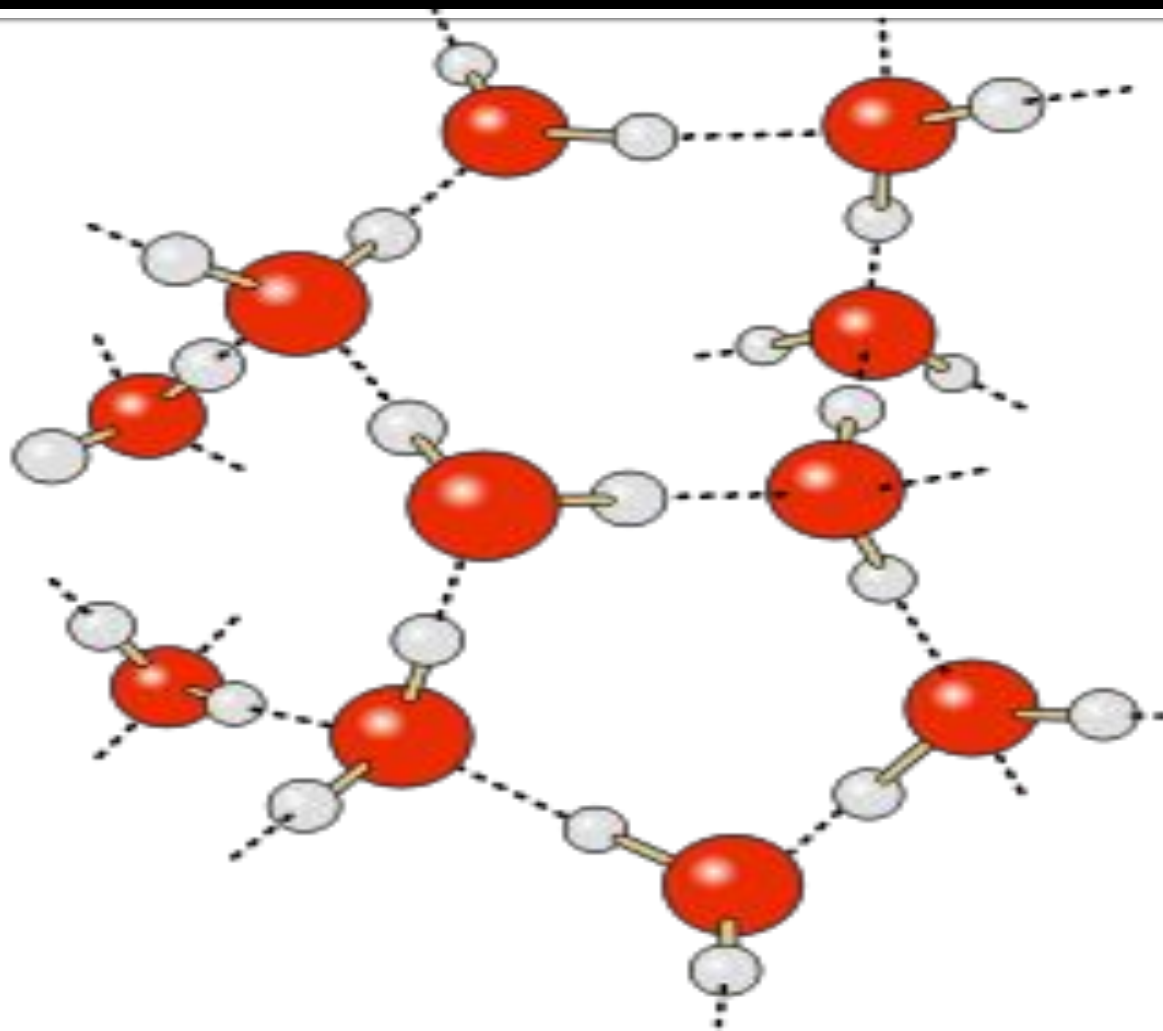
# Описание твёрдых тел

- Твёрдые тела могут быть в [кристаллическом](#) и [аморфном](#) состоянии. Кристаллы характеризуются пространственной периодичностью в расположении равновесных положений атомов<sup>[1]</sup>, которая достигается наличием [дальнего порядка](#)<sup>[2]</sup> и носит название [кристаллической решётки](#). Естественная форма кристаллов — правильные [многогранники](#)<sup>[3]</sup>. В аморфных телах атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек<sup>[4]</sup>, у них отсутствует дальний порядок, но сохраняется [ближний](#), при котором молекулы расположены согласованно на расстоянии, сравнимом с их размерами. Частным случаем аморфного состояния является [стеклообразное состояние](#)<sup>[2]</sup>. Согласно классическим представлениям, устойчивым состоянием (с минимумом [потенциальной энергии](#)) твёрдого тела является кристаллическое. Аморфное тело находится в [метастабильном состоянии](#) и с течением времени должно перейти в кристаллическое состояние, однако время кристаллизации часто столь велико, что метастабильность вовсе не проявляется. Аморфное тело можно рассматривать как жидкость с очень большой (часто бесконечно большой) [вязкостью](#)<sup>[2]</sup>.
- [Атомы](#) и [молекулы](#), составляющие твёрдое тело, плотно упакованы вместе. Другими словами, молекулы твёрдого тела практически сохраняют своё взаимное положение относительно других молекул<sup>[4]</sup> и удерживаются между собой [межмолекулярным взаимодействием](#).
- Многие твёрдые тела содержат в себе кристаллические структуры. В [минералогии](#) и [кристаллографии](#) под кристаллической структурой подразумевается определённый порядок атомов в кристалле. Кристаллическая структура состоит из [элементарных ячеек](#), набора атомов расположенных в особенном порядке, который периодически повторяется во всех направлениях пространственной решётки. Расстояния между элементами этой решётки в различных направлениях называют параметром этой решётки. Кристаллическая структура и [симметричность](#) играют роль в определении множества свойств, таких как [спайность](#) кристалла, электронная зонная структура и [оптические](#) свойства.
  - При применении достаточной силы любое из этих свойств может быть нарушено, вызывая остаточную [деформацию](#).
- Твёрдые тела обладают [тепловой энергией](#), следовательно их атомы совершают колебательное движение. Тем не менее это движение незначительно и не может наблюдаться или быть почувствованным при нормальных условиях.
- Свойства твёрдого тела и движение частиц в нём исследуются в разделе [физики](#), который называется [физикой твёрдого тела](#) (подраздел [физики конденсированных сред](#)). Физика твёрдого тела является самостоятельной научной дисциплиной со специфическими методами исследования и математическим аппаратом. Её развитие диктуется практическими потребностями<sup>[2]</sup>. В зависимости от объекта исследования физика твёрдого тела делится на [физику металлов](#), [полупроводников](#), [магнетиков](#) и других. По методам исследования различают [рентгеновский структурный анализ](#), [радиоспектроскопия](#) и тому подобное. Кроме того, присутствует деление, связанное с изучением определённых свойств (механических, тепловых и так далее)<sup>[1][2]</sup>.
- [Материаловедение](#) главным образом рассматривает вопросы, связанные со свойствами твёрдых тел, такими как [твёрдость](#), [предел прочности](#), сопротивление материала нагрузкам, а также [фазовые](#) превращения. Это значительным образом совпадает с вопросами, изучаемыми физикой твёрдого тела. [Химия твёрдого состояния](#) перекрывает вопросы, рассматриваемые обоими этими разделами знаний, но особенно затрагивает вопросы синтеза новых материалов.

# Классификация твёрдых веществ

- движения внешних электронов его атомов<sup>[1]</sup>. Выделяют пять классов твёрдых тел в зависимости от типа связи между атомами<sup>[2]</sup>:
  - **Ионная связь** (например, [NaCl](#)). Основными силами являются силы электростатического притяжения. Характерные свойства: в инфракрасной области — отражение и поглощение света в инфракрасной области; при низких температурах — малая электропроводность: при высоких температурах — хорошая ионная проводимость.
  - **Ковалентная связь** (например, C ([алмаз](#)), [Ge](#), [Si](#)).
  - **Металлическая связь** (например, [Cu](#), [Al](#)).
  - **Молекулярная связь** (например, [Ar](#),  $\text{CH}_4$ ).
  - **Водородная связь** (например,  $\text{H}_2\text{O}$  ([лёд](#)),  $\text{H}_2\text{F}$ ).
- По виду **зонной структуры** твёрдые тела классифицируют на **проводники**, **полупроводники** и **диэлектрики**.
  - **Проводники** — зона проводимости и валентная зона перекрываются, таким образом электрон может свободно перемещаться между ними, получив любую допустимо малую энергию. Таким образом, при приложении к твердому телу разности потенциалов, электроны смогут свободно двигаться из точки с меньшим потенциалом в точку с большим, образуя электрический ток. К проводникам относят все металлы.
  - **Полупроводники** — зоны не перекрываются и расстояние между ними составляет менее  $4\text{эВ}$ . Для того, чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости требуется энергия меньшая, чем для диэлектрика, поэтому чистые (**собственные**, нелегированные) полупроводники слабо пропускают ток.
  - **Диэлектрики** — зоны не перекрываются и расстояние между ними составляет более  $4\text{эВ}$ . Таким образом, для того, чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости требуется значительная энергия, поэтому диэлектрики ток практически не проводят.
- По магнитным свойствам твёрдые тела делятся на **диамагнетики**, **парамагнетики** и тела с упорядоченной магнитной структурой<sup>[1]</sup>. Диамагнитические свойства, которые слабо зависят от агрегатного состояния или температуры, обычно перекрываются парамагнитными, которые являются следствием ориентации магнитных моментов атомов и электронов проводимости. По закону Кюри парамагнитная восприимчивость убывает обратно пропорциональна температуре и при температуре  $300\text{ K}$  обычно составляет  $10^{-5}$ . Парамагнетики переходят в **ферромагнетики**, **антиферромагнетики** или **ферримагнетики** при понижении температуры

Водородная связь между молекулами воды обозначена чёрными линиями. Жёлтые линии обозначают ковалентную связь, которая удерживает вместе атомы кислорода (красный) и водорода (серый).



# Историческая справка

- Несмотря на то, что твёрдые тела (металлы, минералы) исследовались давно, всестороннее изучение и систематизация информации об их свойствах началось с XVII века. Начиная с этого времени был открыт ряд [эмпирических законов](#), которые описывали влияние на твердое тело механических сил, изменения температуры, света, электромагнитных полей и т. д. Были сформулированы:
  - [закон Гука](#) (1678);
  - [закон Дюлонга — Пти](#) (1819);
  - [закон Ома](#) (1826);
  - [закон Видемана — Франца](#) (1853) и др.
- Уже в первой половине XIX века были сформулированы основные положения теории упругости, для которой характерно представление о твёрдом теле как о [сплошной среде](#).
- Целостное представление о кристаллической структуре твёрдых тел, как совокупности атомов, упорядоченное размещение которых в пространстве обеспечивается силами взаимодействия было сформировано [Огюстом Браве](#) в 1848 году, хотя первые идеи такого рода высказывались в трактатах [Николаса Стено](#) (1669), [Рене Жюста Гаюи](#) (1784), [Исааком Ньютоном](#) в работе «[Математические начала натуральной философии](#)» (1686), в которой рассчитана скорость звука в цепочке упруго связанных частиц, [Даниилом Бернулли](#) (1727), [Огюстеном Луи Коши](#) (1830) и др.

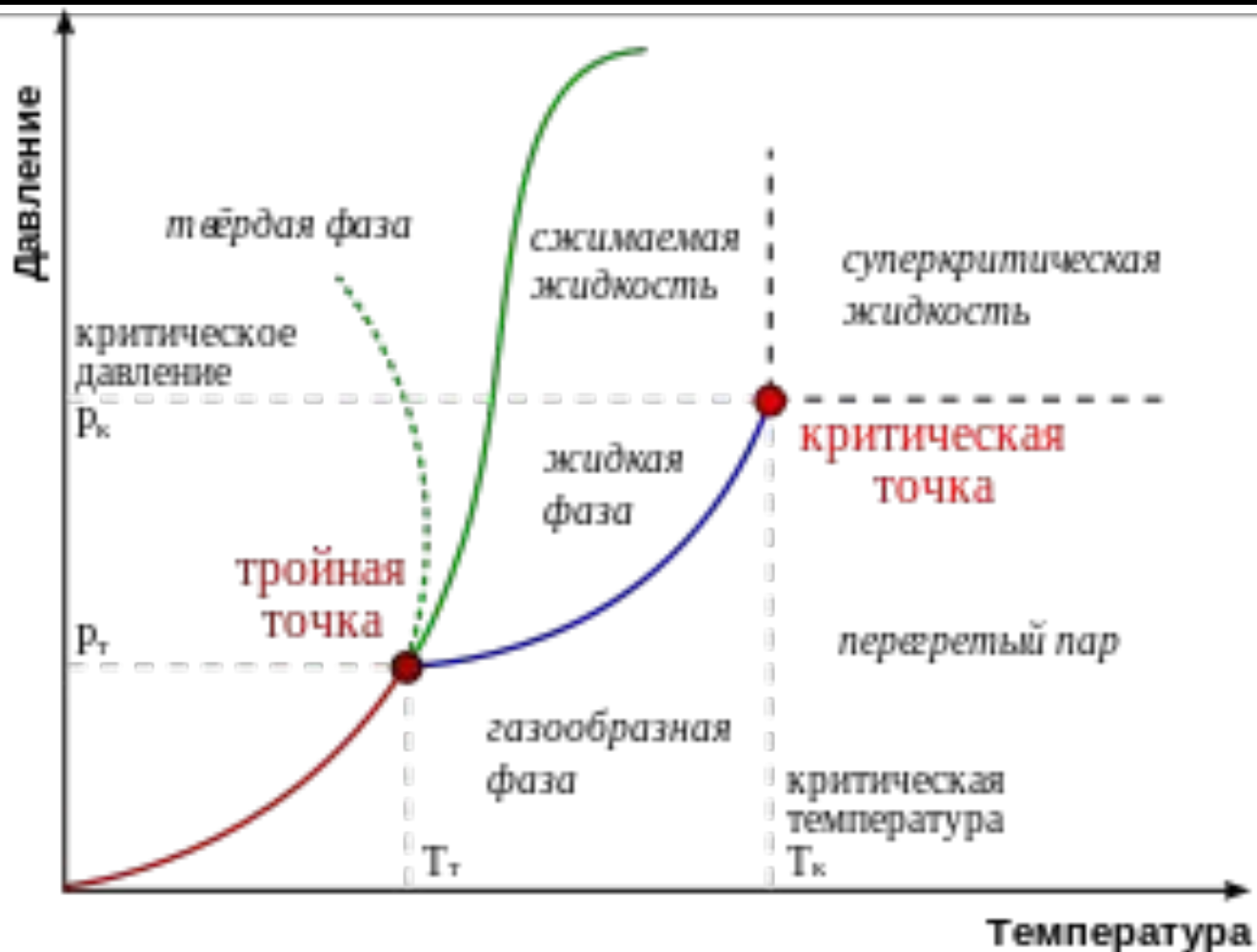


# Фазовые переходы

- При повышении температуры твёрдые тела переходят в жидкое или газообразное состояние. Переход твердого тела в жидкость называется плавлением, а переход в газообразное состояние, минуя жидкое, — сублимацией. Переход к твёрдому телу (при понижении температуры) — кристаллизация, к аморфной фазе — стеклование.
- Существуют также фазовые переходы между твердотельными фазами, при которых изменяется внутренняя структура твёрдых тел, становясь упорядоченной при понижении температуры.
- При атмосферном давлении и температуре  $T > 0 \text{ K}$  все вещества в природе затвердевают. Исключение составляет гелий, для кристаллизации которого необходимо давление  $24 \text{ атм}$ <sup>[2]</sup>.

## Фазовая диаграмма воды.

Плавлению (и кристаллизации) соответствует ветвь левее и выше тройной точки, сублимации — ветвь левее и ниже тройной точки. Зелёная пунктирная линия показывает аномальное поведение воды.



# Физические свойства

- Под физическими свойствами твёрдых тел понимается их специфическое поведение при воздействии определенных сил и полей. Существует три основных способа воздействия на твёрдые тела, соответствующие трем основным видам энергии: механический, термический и электромагнитный. Соответственно выделяют три основные группы физических свойств.
- Механические свойства связывают механические напряжения и деформации тела, согласно результатам широких исследований механических и реологических свойств твёрдых тел, выполненных школой академика П. А. Ребиндера, можно разделить на упругие, прочностные, реологические и технологические. Кроме того, при воздействии на твёрдые тела жидкостей или газов оказываются их гидравлические и газодинамические свойства.
- К термическим относят свойства, которые оказываются под воздействием тепловых полей. В электромагнитные свойства условно можно отнести радиационные, проявляющиеся при воздействии на твёрдое тело потоков микрочастиц или электромагнитных волн значительной жесткости (рентгеновских, гамма-лучи).
- Легчайшим известным твёрдым материалом является аэрогель. Некоторые виды аэрогеля имеют плотность  $1.9 \text{ мг/см}^3$  или  $1.9 \text{ кг/м}^3$  (1/530 плотности воды).

# Механические свойства

- В покое твёрдые тела сохраняют форму, но деформируются под воздействием внешних сил. В зависимости от величины приложенной силы [деформация](#) может быть упругой, пластической или разрушительной. При упругой деформации тело возвращает себе первоначальную форму после снятия приложенных сил. Отзыв твёрдого тела на прилагаемое усилие описывается [модулями упругости](#). Отличительной особенностью твёрдого тела по сравнению с жидкостями и газами является то, что оно сопротивляется не только растяжению и сжатию, а также [сдвигу](#), [изгибу](#) и [кручению](#).
- При [пластической деформации](#) начальная форма не сохраняется. Характер деформации зависит также от времени, в течение которого действует внешняя сила. Твёрдое тело может [деформироваться упруго](#) при мгновенном действии, но пластически, если внешние силы действуют длительное время. Такое поведение называется [ползучестью](#). Одной из характеристик деформации является твёрдость тела — способность сопротивляться проникновению в него других тел.
- Каждое твёрдое тело имеет присущий ему [порог деформации](#), после которой наступает разрушение. Свойство твёрдого тела сопротивляться разрушению характеризуется [прочностью](#). При разрушении в твёрдом теле появляются и распространяются [трещины](#), которые в конце концов приводят к разлому.
- К механическим свойствам твёрдого тела принадлежит также его способность проводить [звук](#), который является волной, переносящий локальную деформацию с одного места в другое. В отличие от жидкостей и газов в твёрдом теле могут распространяться не только продольные звуковые волны, но и поперечные, что связано с сопротивлением твёрдого тела деформации сдвига. Скорость звука в твёрдых телах в целом выше, чем в газах, в частности в воздухе, поскольку межатомное взаимодействие гораздо сильнее. Скорость звука в кристаллических твёрдых телах характеризуется [анизотропией](#), то есть зависимости от направления распространения.

# Тепловые свойства

- Важнейшим тепловым свойством твёрдого тела является [температура плавления](#) — температура, при которой происходит переход в жидкое состояние. Другой важной характеристикой плавления является [скрытая теплота плавления](#). В отличие от кристаллов, в аморфных твёрдых телах переход к жидкому состоянию с повышением температуры происходит постепенно. Его характеризуют температурой стеклования — температурой, выше которой материал почти полностью теряет упругость и становится очень пластичным.
- Изменение температуры вызывает деформацию твёрдого тела, в основном повышение температуры приводит к расширению. Количественно она характеризуется [коэффициентом теплового расширения](#). Теплоемкость твёрдого тела зависит от температуры, особенно при низких температурах, однако в области комнатных температур и выше, множество твёрдых тел имеют примерно постоянную теплоемкость ([закон Дюлонга — Пти](#)). Переход к устойчивой зависимости теплоемкости от температуры происходит при характерной для каждого материала [температуре Дебая](#). От температуры зависят также другие характеристики твердотельных материалов, в частности механические: пластичность, текучесть, прочность, твёрдость.

# Электрические и магнитные свойства

- В зависимости от величины [удельного сопротивления](#) твёрдые тела разделяются на проводники и [диэлектрики](#), промежуточное положение между которыми занимают [полупроводники](#). Полупроводники имеют малую электропроводность, однако для них характерно ее рост с температурой. Электрические свойства твёрдых тел связаны с их электронной структурой. Для диэлектриков свойственна [щель](#) в энергетическом спектре электронов, которую в случае кристаллических твёрдых тел называют запрещенной зоной. Это область значений энергии, которую электроны в твёрдом теле не могут иметь. В диэлектриках все электронные состояния, ниже щели заполнены, и благодаря принципу Паули электроны не могут переходить из одного состояния в другое, чем обусловлено отсутствие проводимости. Проводимость полупроводников очень сильно зависит от примесей — [акцепторов](#) и [доноров](#).
- Существует определенный класс твёрдых тел, для которых характерна [ионная проводимость](#). Эти материалы называют [супериониками](#). В основном это [ионные кристаллы](#), в которых ионы одного сорта могут достаточно свободно двигаться между неизбежной решёткой ионов другого сорта.
- При низких температурах для некоторых твёрдых тел свойственна [сверхпроводимость](#) — способность проводить электрический ток без сопротивления.
- Существует класс твёрдых тел, которые могут иметь спонтанную поляризацию — [пироэлектрики](#). Если это свойство характерно только для одной из фаз, что существует в определенном промежутке температур, то такие материалы называются [сегнетоэлектриками](#). Для [пьезоэлектриков](#) характерна сильная связь между поляризацией и механической деформацией.
- [Ферромагнетикам](#) свойственно существование спонтанного [магнитного момента](#).
- Оптические свойства твёрдых тел очень разнообразны. Металлы в основном имеют высокий коэффициент отражения света в видимой области спектра, много диэлектриков прозрачны, как, например, стекло. Часто цвет того или другого твёрдого тела обусловлен поглощающими свет примесями. Для полупроводников и диэлектриков характерна [фотопроводимость](#) — увеличение электропроводности при освещении.

# Идеализации твёрдого тела в науках

- разнообразных свойств, которая постоянно пополняется. В зависимости от поставленных перед определённой наукой задач важны лишь отдельные свойства твёрдого тела, другие — несущественные. Например, при исследовании [прочности](#) стали её магнитные свойства существенного значения не играют.
- Для простоты изучения реальное тело заменяют идеальным, выделяя лишь важнейшие свойства для рассматриваемого случая. Такой подход, применяемый многими науками, называется [абстрагированием](#). После выделения идеализированного тела с определённым перечнем существенных свойств, строится теория. Достоверность такой теории зависит от того насколько удачно принятая идеализация отражает существенные характеристики объекта. Оценку этому можно дать при сравнении результатов исследований, полученных теоретически на основе идеализированной модели и экспериментально.
- **В теоретической механике**
- Основная статья: [Абсолютно твёрдое тело](#)
- В теоретической механике идеализированной схемой реального твёрдого тела является абсолютно твёрдое тело, то есть такое, в котором при любых обстоятельствах расстояния между любыми точками являются постоянными — не изменяются ни размеры, ни форма тела.
- **В теории упругости**
- Основная статья: [Абсолютно упругое тело](#)
- В теории упругости и её прикладном применении сопромату также рассматриваются модели, которые учитывают и абсолютизируют отдельные свойства твёрдого тела. К этим свойствам Принятие условий однородности и сплошности при малых деформациях позволяет применить методы анализа бесконечно малых величин, что существенно упрощает построение теории сопротивления материалов.
- Считается также, что зависимость между напряжениями и деформациями является линейной (см. [Закон Гука](#)).
- **В теории пластичности**
- В [теории пластичности](#) модели твёрдого тела основаны на идеализации свойств деформационного упрочнения или свойств текучести твёрдых тел в [напряжённо-деформированном состоянии](#).

# Деформация

- **Деформация** (от [лат.](#) *deformatio* — «искажение») — изменение взаимного положения частиц тела, связанное с их [перемещением](#) относительно друг друга. Деформация представляет собой результат изменения межатомных расстояний и перегруппировки блоков [атомов](#). Обычно деформация сопровождается изменением величин межатомных сил, мерой которого является упругое [механическое напряжение](#).
- Причины отказа механики [Прогиб](#) [Коррозия](#) [Пластическая деформация](#) [Усталость материала](#) [Удар](#) [Трещина](#) [Плавление](#) [Износ](#) Шаблон: [Просмотр](#) • [Обсуждение](#) • [Править](#)
- Деформации разделяют на обратимые (упругие) и необратимые (пластические, ползучести). [Упругие деформации](#) исчезают после окончания действия приложенных сил, а необратимые — остаются. В основе упругих деформаций лежат обратимые смещения атомов металлов от положения равновесия (другими словами, атомы не выходят за пределы межатомных связей); в основе необратимых — необратимые перемещения атомов на значительные расстояния от исходных положений равновесия (то есть выход за рамки межатомных связей, после снятия нагрузки переориентация в новое равновесное положение).
- Пластические деформации — это необратимые деформации, вызванные изменением напряжений. Деформации [ползучести](#) — это необратимые деформации, происходящие с течением времени. Способность веществ пластически деформироваться называется пластичностью. При пластической деформации металла одновременно с изменением формы меняется ряд свойств — в частности, при холодном деформировании повышается [прочность](#).



# План:

## 1 Виды деформации

### ■ 2 Изучение деформации

### ■ 3 Причины возникновения деформации твёрдых тел

### ■ 4 Упругая и пластическая деформация

### ■ 5 Сплошность

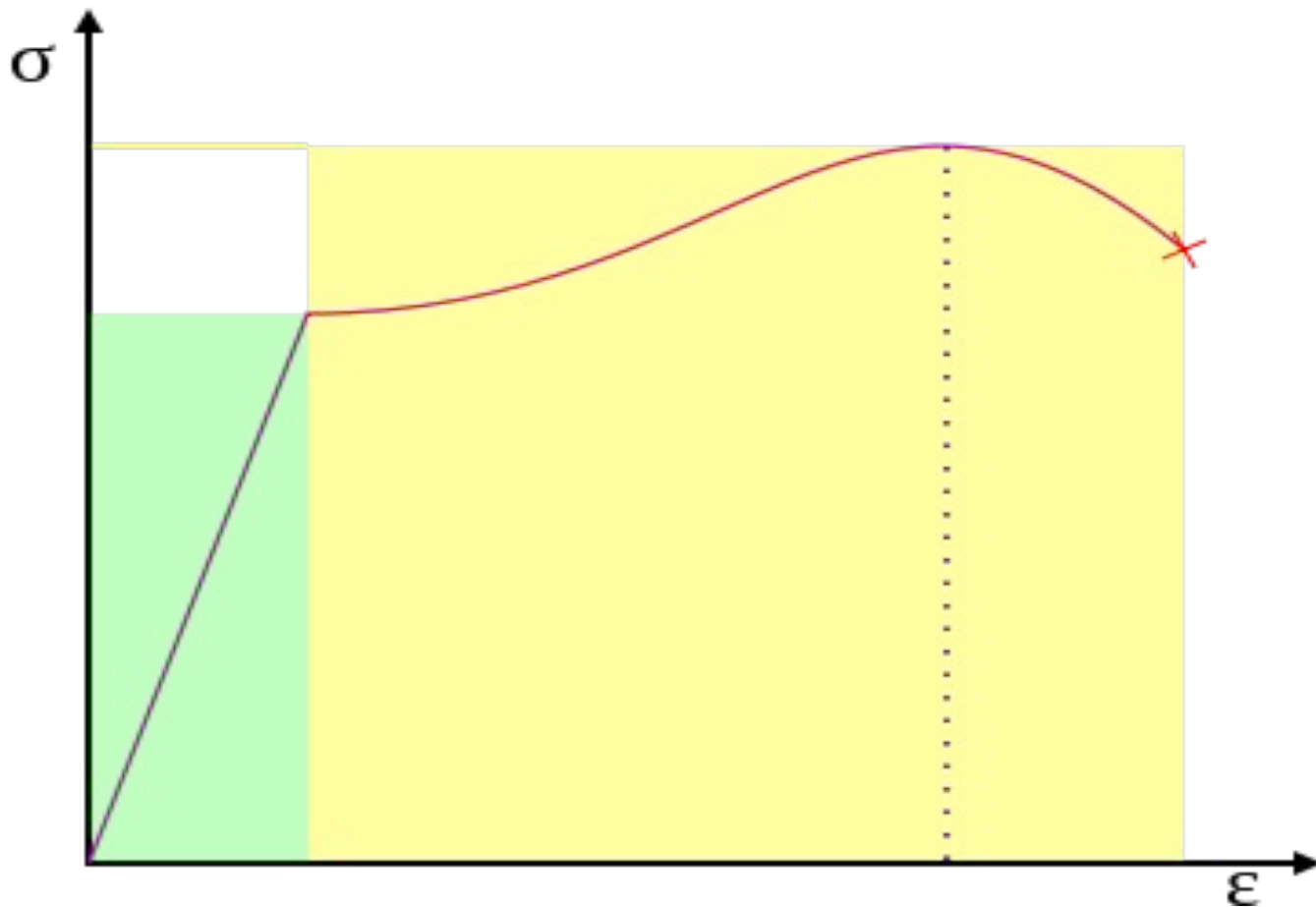
### ■ 6 Простейшая элементарная деформация

### ■ 7 Измерение деформации

# Виды деформации

- Наиболее простые виды деформации тела в целом:
- растяжение-сжатие,
- сдвиг,
- изгиб,
- кручение.
- В большинстве практических случаев наблюдаемая деформация представляет собой совмещение нескольких одновременных простых деформаций. В конечном счёте, любую деформацию можно свести к двум наиболее простым: растяжению (или сжатию) и сдвигу.

Диаграмма, показывающая зависимость между механическим напряжением ( $\sigma$ ) и деформацией ( $\epsilon$ ) обобщённого материала. Слева — упругие деформации, справа — пластические



# Изучение деформации

- Деформация физического тела вполне определяется, если известен вектор перемещения каждой его точки.
- Деформация твёрдых тел в связи со структурными особенностями последних изучается физикой твёрдого тела, а движения и напряжения в деформируемых твёрдых телах — теорией упругости и пластичности. У жидкостей и газов, частицы которых легкоподвижны, исследование деформации заменяется изучением мгновенного распределения скоростей.

# Причины возникновения деформации твёрдых тел

- Деформация твёрдого тела может явиться следствием фазовых превращений, связанных с изменением объёма, теплового расширения, намагничивания (магнитострикция), появления электрического заряда (пьезоэлектрический эффект) или же результатом действия внешних сил.

# Упругая и пластическая деформация

- Деформация называется [упругой](#), если она исчезает после удаления вызвавшей её нагрузки (то есть тело возвращается к первоначальным размерам и форме), и пластической, если после снятия нагрузки деформация не исчезает (или исчезает не полностью).
- Все реальные твёрдые тела при деформации в большей или меньшей мере обладают пластическими свойствами. При некоторых условиях пластическими свойствами тел можно пренебречь, как это и делается в теории упругости. Твёрдое тело с достаточной точностью можно считать упругим, то есть не обнаруживающим заметных пластических деформаций, пока нагрузка не превысит некоторого предела ([предел упругости](#)).
- Природа пластической деформации может быть различной в зависимости от [температуры](#), продолжительности действия нагрузки или скорости деформации. При неизменной нагрузке, приложенной к телу, деформация изменяется со временем; это явление называется [ползучестью](#). С возрастанием температуры скорость ползучести увеличивается. Частными случаями ползучести являются [релаксация](#) и [упругое последействие](#). Одной из теорий, объясняющих [механизм пластической деформации](#), является теория дислокаций в [кристаллах](#).

# Сплошность

- В теории упругости и пластичности тела рассматриваются как «сплошные». Сплошность (то есть способность заполнять весь объём, занимаемый материалом тела, без всяких пустот) является одним из основных свойств, приписываемых реальным телам. Понятие сплошности относится также к элементарным объёмам, на которые можно мысленно разбить тело. Изменение расстояния между центрами каждой двух смежных бесконечно малых объёмов у тела, не испытывающего разрывов, должно быть малым по сравнению с исходной величиной этого расстояния.

# Измерение деформации

- Измерение деформации производится либо в процессе испытания материалов с целью определения их механических свойств, либо при исследовании сооружения в натуре или на моделях для суждения о величинах напряжений. Упругие деформации весьма малы, и их измерение требует высокой точности. Измерение деформаций называется [тензометрией](#); измерения обычно производятся с помощью [тензометров](#). Кроме того, широко применяются резистивные [тензодатчики](#), поляризационно-оптический метод исследования напряжения, [рентгеноструктурный анализ](#). Для суждения о местных пластических деформациях применяют накатку на поверхности изделия сетки, покрытие поверхности легко растрескивающимся [лаком](#) или хрупкими прокладками и т. д.



# Простейшая элементарная деформация

- Простейшей элементарной деформацией является относительное удлинение некоторого элемента:

$$\epsilon = (l_2 - l_1) / l_1$$