



ПОЧЕМУ КОНСТРУКЦИИ
ИСПЫТЫВАЮТ СТРЕСС...

ДА, ПОЧЕМУ?

- Немного о напряжениях, деформациях и разрушении...



КОНСТРУКЦИИ

- Конструкцией мы называем сооружение из различных материалов, предназначенное для того, чтобы выдерживать нагрузки.
- Если конструкции рушатся, велика вероятность гибели людей, поэтому инженеры всегда с пристрастием изучают их поведение.



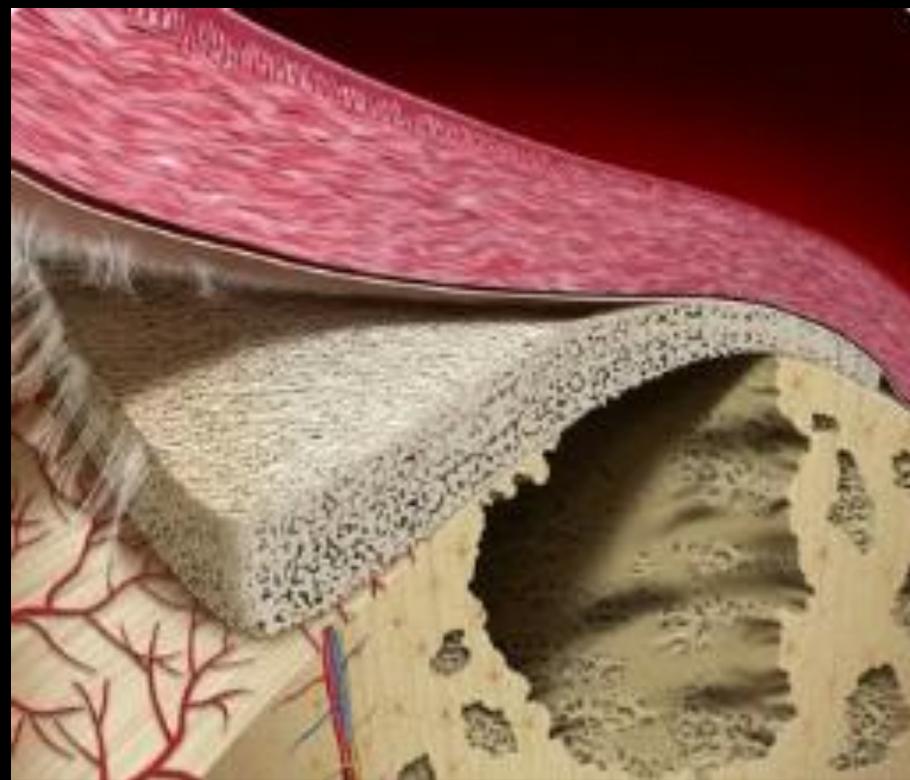
ЖИВЫЕ КОНСТРУКЦИИ

- Биологические конструкции появились на свет задолго до искусственных.
- Природа породила жизнь — а вместе с ней и стремление к обособлению, — ей понадобилась оболочка, куда эту жизнь возможно было бы поместить.
- Чтобы одновременно удержать в себе живую материю и защитить ее от воздействия внешних сил, эта оболочка или пленка должна была обладать каким-то минимумом механической прочности.



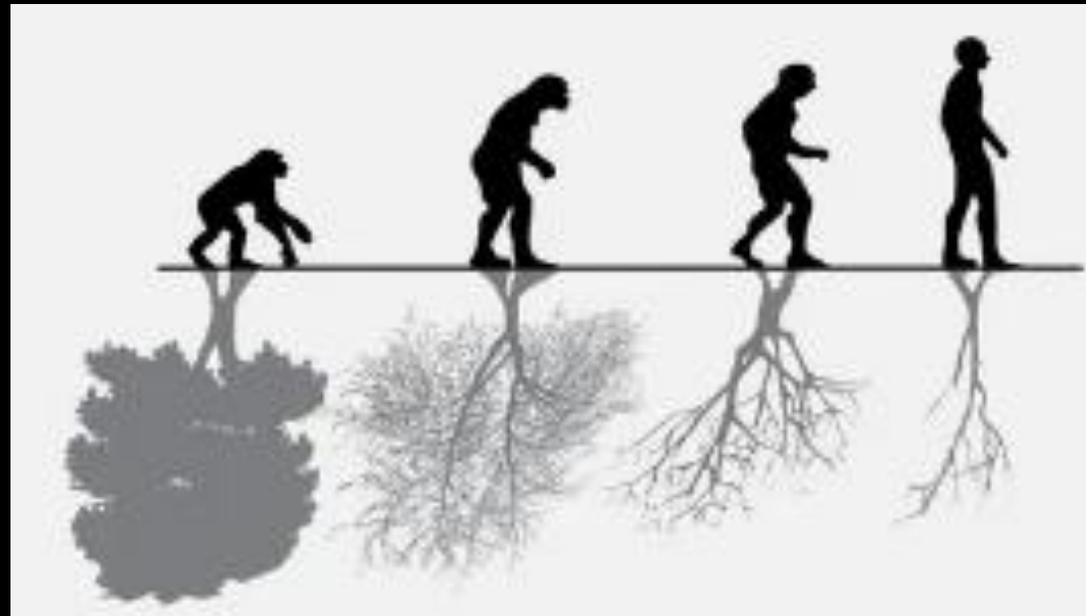
НЕМНОГО ОБ ЭВОЛЮЦИИ

- Эволюционные преимущества достигались за счет появления более прочных биологических материалов и более замысловатых живых конструкций. Аристотель называл это аллелофагией, или взаимным поеданием, а Дарвин — термином естественный отбор.
- Интересно, что **мягкие ткани обычно весьма прочны**, тогда как **твердые материалы**, например кости, напротив, **довольно хрупки**.
- Жесткий скелет в их организме составляет лишь небольшую часть целого, причем, **мягкие части тела весьма хитроумно приспособлены** для того, чтобы свести к **минимуму нагрузку на скелет** и тем самым избежать последствий его хрупкости.



ТВЕРДОЕ ИЛИ МЯГКОЕ?

- Если тела большинства животных главным образом состоят из мягких тканей, то в случае с растениями это не всегда так. Гибкими и мягкими обычно являются мелкие и примитивные виды.



ДО И ПОСЛЕ МЕТАЛЛА...

- Бенджамин Франклин (1706–1790) дал человеку определение: «Животное, производящее орудия».
- В отдаленных уголках мира **дометаллические культуры** просуществовали до недавнего времени, и многие артефакты выставлены на всеобщее обозрение в музеях.
- С появлением стекловолокна и других композитных материалов мы вновь периодически обращаемся к конструкциям из **волоконистых неметаллических материалов**.
- *Собственно говоря, знакомство цивилизованного мира с технологическими металлами примерно в 2000–1000 годах до нашей эры не оказало такого уж сильного и непосредственного эффекта на большинство искусственных сооружений, так как металл был редок, дорог и сложен в обработке.*



ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ

- — Скажите, а чем вы занимаетесь?
- — Материаловедением, изучаю материалы.
- — Как это здорово, наверное, подбирать ткани для платьев!

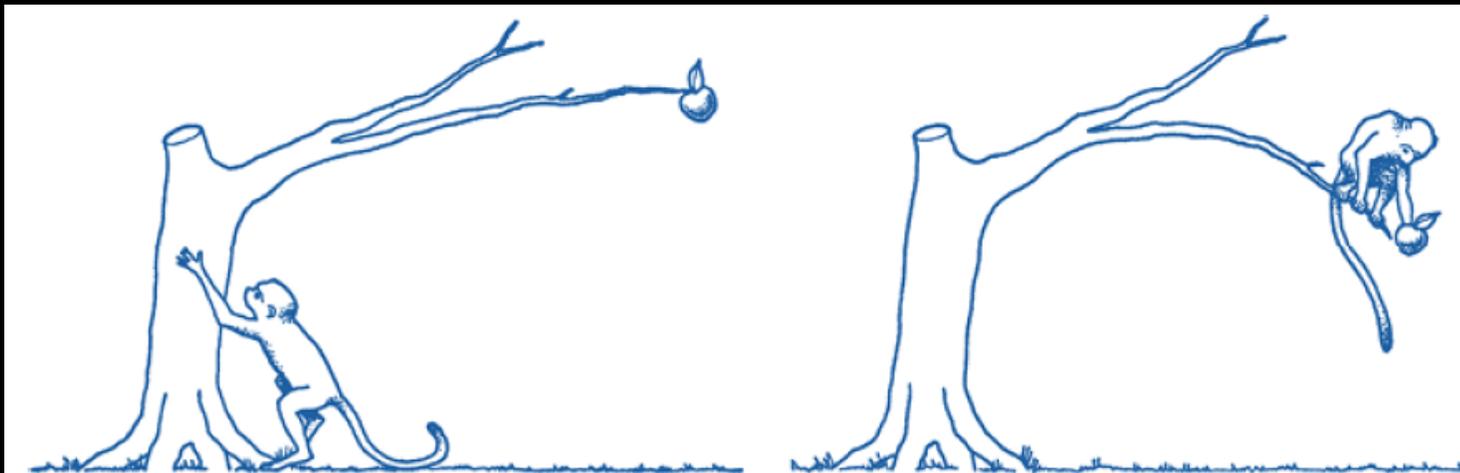


Рис. 4, 5. Все материалы и конструкции в той или иной степени деформируются под действием нагрузки. Теория упругости изучает соотношение сил и деформаций. Под весом обезьяны материал ветки находится в состоянии растяжения с верхней стороны и в состоянии сжатия — с нижней

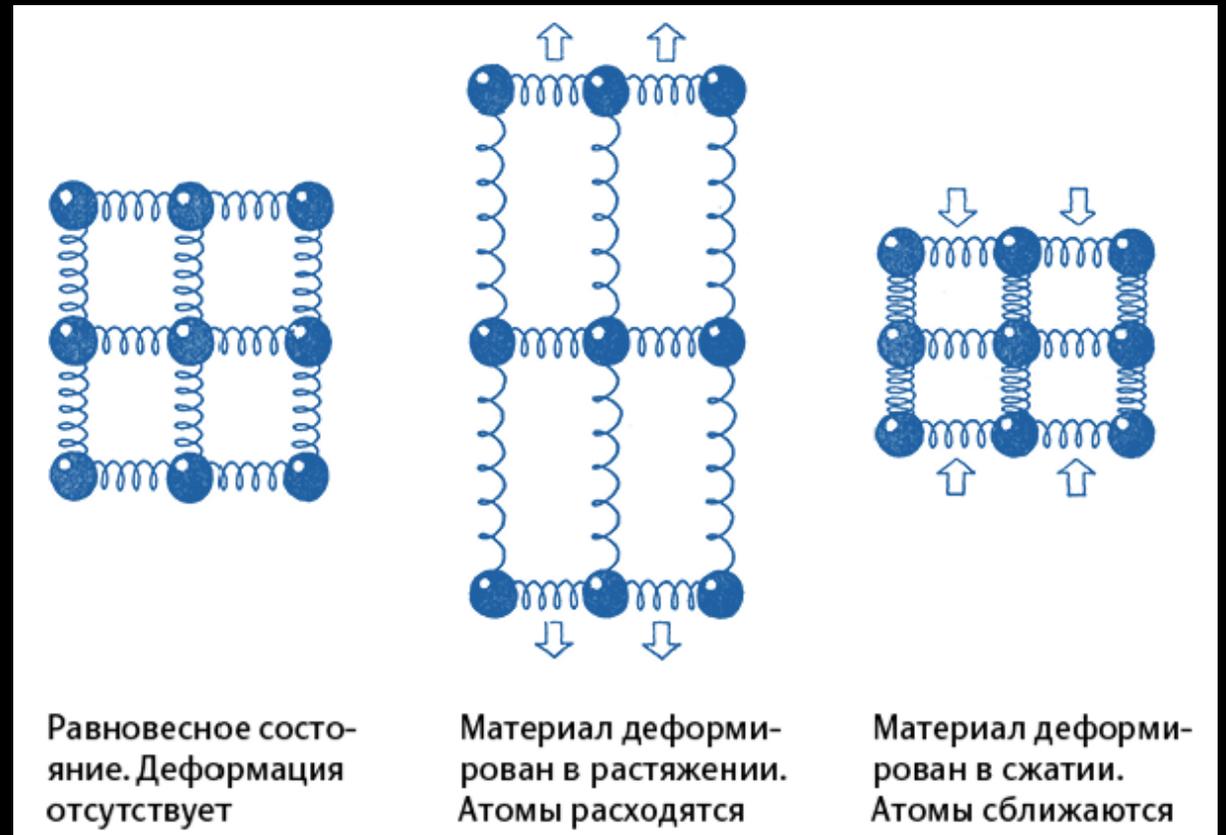
ДЕФОРМАЦИИ – ЭТО НОРМАЛЬНО

- Важно понимать, что вызванная нагрузкой деформация совершенно нормальна для любой конструкции. Если деформация не препятствует непосредственным функциям конструкции, она является не недостатком или браком, а скорее неотъемлемой ее характеристикой, без которой конструкция просто не будет работать.
- Теория упругости посвящена **взаимодействию сил и деформаций** в материалах или конструкциях.
- *Четыре главные колонны внутри Солсберийского собора — они довольно ощутимо изогнуты*



ЧТО ДЕФОРМИРУЕТСЯ ВНУТРИ МАТЕРИАЛА?

- Гук сделал еще один важный шаг в цепи своих рассуждений, который даже сейчас довольно сложен для широкого понимания... Он предположил, что, когда та или иная конструкция деформируется под действием нагрузки, материал, из которого она сделана, также **подвергается внутреннему растяжению или сжатию даже на самом мельчайшем уровне.**
- Атомы и молекулы, из которых состоит материал, разъезжаются в стороны или сближаются, а вещество таким образом растягивается или сжимается

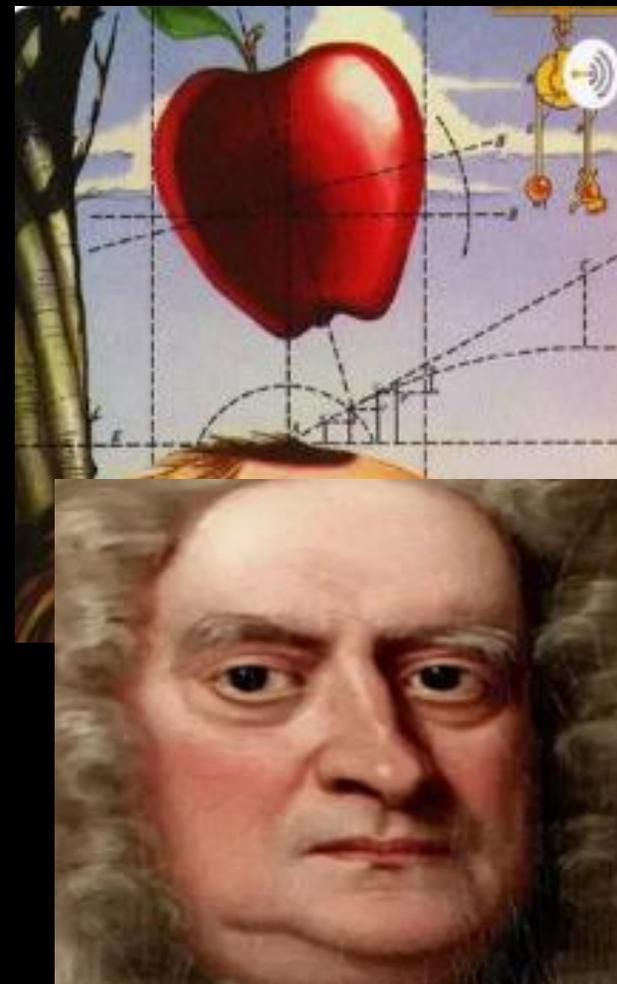


- Гук провел множество экспериментов с предметами из разных материалов и разной геометрической формы — **пружинами, веревками и балками**. Подвешивая на них разные грузы и измеряя деформацию, он продемонстрировал, что **деформация каждого из этих предметов обычно пропорциональна весу груза**.
- Более того, он обнаружил, что в пределах точности измерений (которая во времена Гука была невысокой) **большинство твердых тел возвращаются к своей первоначальной форме**, когда нагрузка, вызывавшая деформацию, перестает действовать.
- При этом **множество твердых и «околотвердых» веществ**, таких как пластилин или оконная замазка, **не возвращаются полностью к своей форме**, а остаются в деформированном состоянии, даже когда нагрузка прекращает свое действие. Такое поведение называется **пластичностью**.
- «Обкатав» свои идеи в беседах с сэром Кристофером Реном, в 1679 году Гук опубликовал результаты экспериментов в статье под названием **«О восстановительной способности или об упругости»**. В ней он сформулировал знаменитый принцип **«каково растяжение, такова и сила»**, который вот уже триста лет известен под названием **«закон Гука»**.



ut tensio sic vis!

- Строго научный способ решения этих задач появился лишь через 120 лет после смерти Роберта Гука.
- На этом фоне нельзя обойти стороной **влияние личности Ньютона (1642–1727)** и последствия его ожесточенной **вражды с Гуком**. С точки зрения интеллектуальных способностей Гук, возможно, не уступал Ньютону.
- В отличие от Ньютона, **Гук был абсолютно земным человеком и пытался решать бесчисленные практические задачи**, связанные с упругостью, пружинами, часами, зданиями, микроскопами и строением блох.
- **Ньютон, возможно, мыслил масштабнее Гука**, однако его научные интересы были куда менее практическими.
- в XVIII веке ситуация сложилась так, что, несмотря на предложенное Гуком общее понимание принципов действия конструкций, его работу никто не стал продолжать и внедрять.



ЧТО БЫЛО ДАЛЬШЕ?

- На протяжении всего XVIII столетия и значительную часть XIX-го весьма умные люди, такие как Леонард Эйлер (1707–1783) и Томас Юнг (1773–1829), в своих попытках решить задачи, для современного инженера совершенно незатейливые, занимались самой невероятной интеллектуальной эквилибристикой.
- Концепция об упругих состояниях в конкретной точке материала — это концепция напряжения и деформации.
- Впервые подобную идею в 1822 году в общем виде высказал Огюстен Коши (1789–1857) в статье для Французской академии наук.



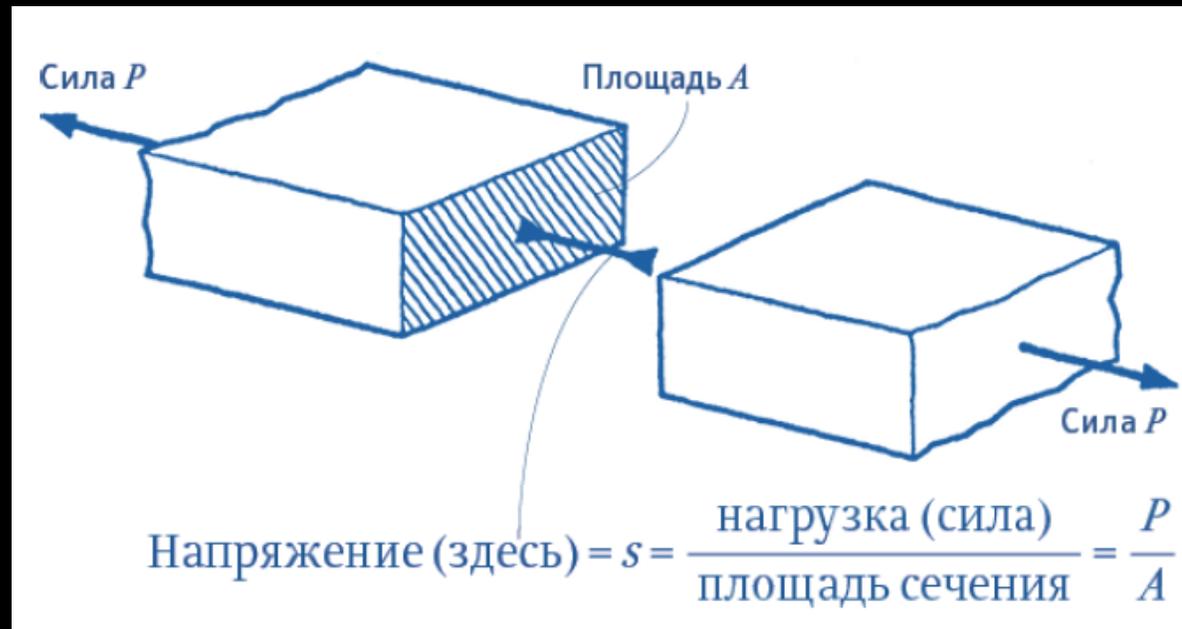
Огюстен Коши (1789–1857)

НАПРЯЖЕНИЕ

- В числовом виде напряжение в любом направлении в определенной точке — это просто сила или нагрузка, действующая в этой точке, разделенная на площадь применения этой силы

$$\text{напряжение} = s = \frac{\text{нагрузка}}{\text{площадь}} = \frac{P}{A},$$

- Напряжение в бруске в состоянии растяжения. (Ситуация в сжатии совершенно аналогична.)



НАПРЯЖЕНИЕ

- Здесь возникает большой вопрос: в каких же единицах измерять напряжение? Его можно измерять как соотношение силы в любых единицах и площади в любых единицах, как, собственно, часто и делается.
- Меганьютоны на квадратный метр — MN/m^2
 - Это единица измерения системы СИ. Как известно, в системе СИ сила измеряется в ньютонах.
 - 1 ньютон (Н) = 0,102 килограмм-силы (кгс) = 0,225 фунта (примерный вес яблока).
 - 1 меганьютон (МН) = 1 000 000 ньютонов, что составляет почти 100 тонна-сил.
- Килограмм-сила на квадратный сантиметр — $\text{кгс}/\text{см}^2$
- Важно понимать, что напряжение в материале, подобно давлению в жидкости — это состояние, которое существует в точке и не связано с какой-либо конкретной плоскостью сечения

ДЕФОРМАЦИЯ

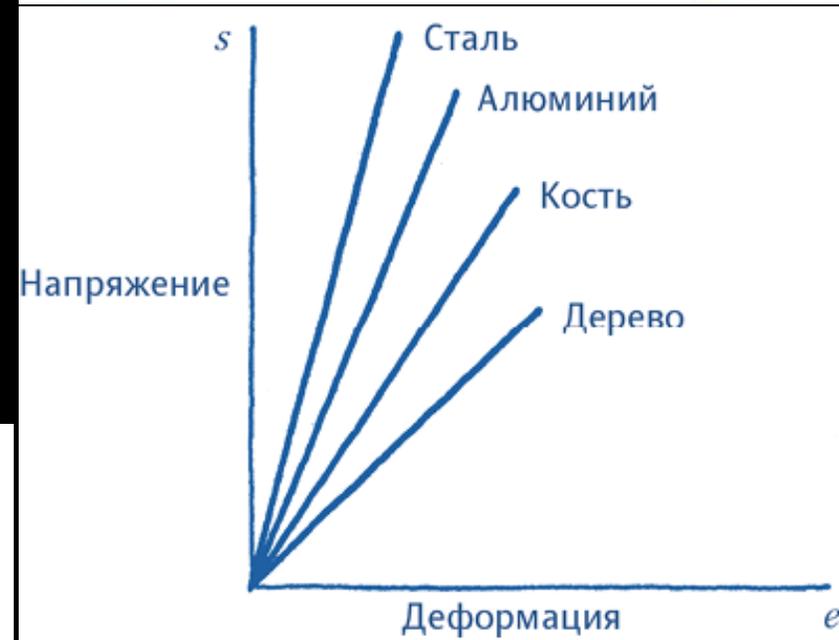
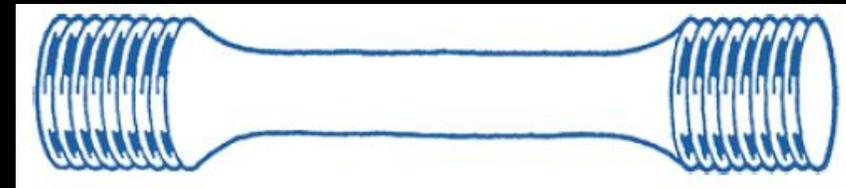
- Подобно тому как под напряжением мы понимаем, насколько трудно — другими словами, с приложением какой силы — растаскиваются атомы твердого тела в той или иной точке, под деформацией мы понимаем, насколько далеко они растаскиваются, то есть в какой пропорции растягиваются связи между атомами.
- Пример: если изначальная длина веревки составляла 2 метра (200 сантиметров), а под весом кирпича она растянулась на 1 сантиметр, то деформация веревки составила

$$e = \frac{l}{L} = \frac{1}{200} = 0,005, \text{ или } 0,5 \%$$

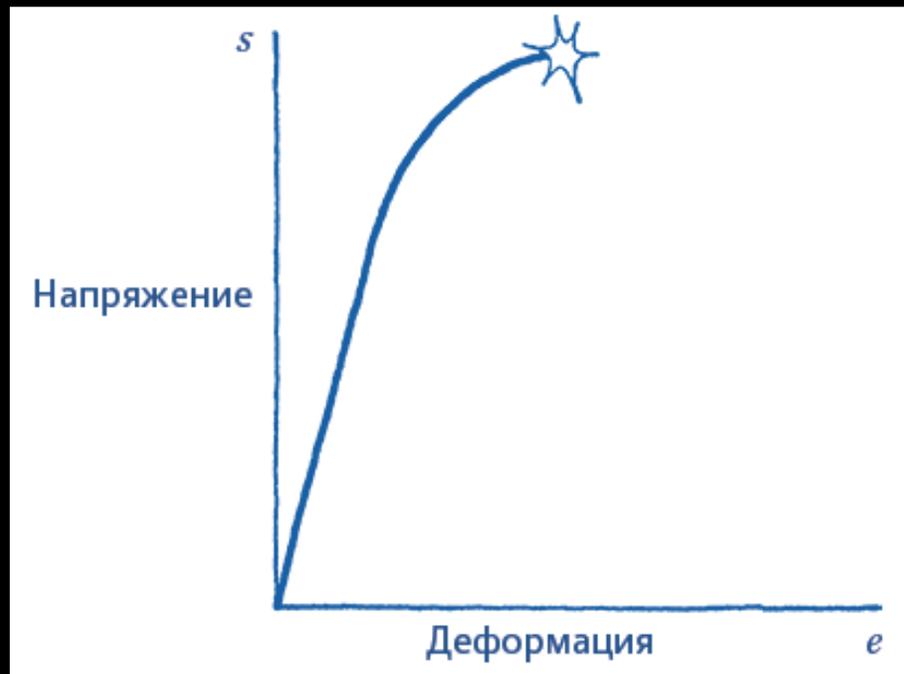


ИСПЫТАНИЯ

- Типичный образец для испытаний на растяжение
- если нужно провести испытание того или иного материала, мы используем тестовый образец, сделанный из этого материала. Формы этих изделий могут сильно различаться, однако типичный тестовый образец, как правило, имеет стержень постоянного сечения, на котором, собственно, и проводятся измерения, и утолщенные концы для закрепления в испытательной машине.



$$\frac{\text{напряжение}}{\text{деформация}} = \frac{s}{e} = E \text{ (модуль упругости Юнга постоянный для материала)}$$



Psi - Фунт-сила на квадратный дюйм

Материал	Модуль Юнга	
	psi	МН/м ²
Мягкая кутикула оплодотворенной саранчи *	30	0,2
Резина	1000	7
Мягкая оболочка яйца (под скорлупой)	1100	8
Хрящ человека	3500	24
Сухожилие человека	80 000	600
Гипсокартон	200 000	1400
Неармированные пластмассы, полиэтилен, нейлон	200 000	1400
Фанера	1 000 000	7000
Дерево (вдоль волокон)	2 000 000	14000
Кость (свежая)	3 000 000	21 000
Металлический магний	6 000 000	42000
Обычное стекло	10 000 000	70000
Сплавы алюминия	10 000 000	70000
Латунь и бронза	17 000 000	120 000
Железо и сталь	30 000 000	210 000
Оксид алюминия (сапфир)	60 000 000	420 000
Алмаз	170 000 000	1 200 000

* Информация любезно предоставлена доктором Джулианом Винсентом, отделение зоологии, Университет Рединга, Великобритания.

КОГДА ПРОИСХОДИТ РАЗРУШЕНИЕ?

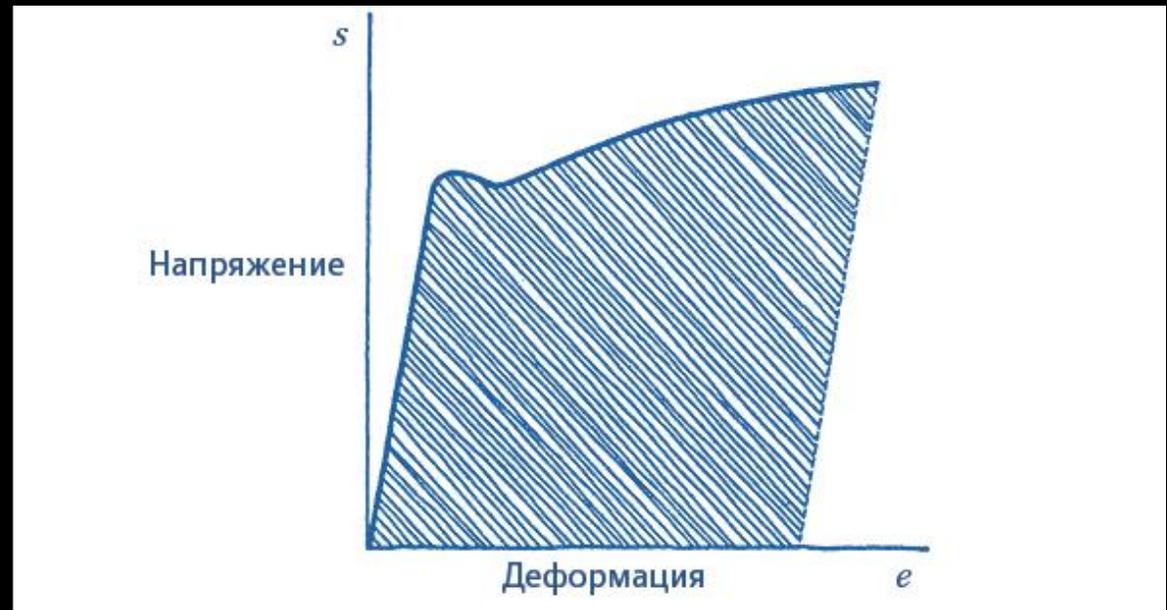
- Чтобы материал в натяжении начал разрушаться, в поперечном сечении должна пройти трещина.
- Для образования трещины необходим запас энергии...
- Все упругие материалы, испытывающие действие нагрузки, запасают тот или иной объем энергии деформации, и эта энергия потенциально всегда может быть обращена в процесс разрыва или разрушения.

тягучесть

Материал	Работа разрушения, Дж/м ²	Прочность на разрыв (номинальная), МН/м ²
Стекло, керамика	1–10	170
Цемент, кирпич, камень	3–40	4
Полиэстер и эпоксидные смолы	100	50
Нейлон, полиэтилен	1000	150–600
Кости, зубы	1000	200
Дерево	10000	100
Мягкая сталь	100000–1000000	400
Высокопрочная сталь	10000	1000

ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

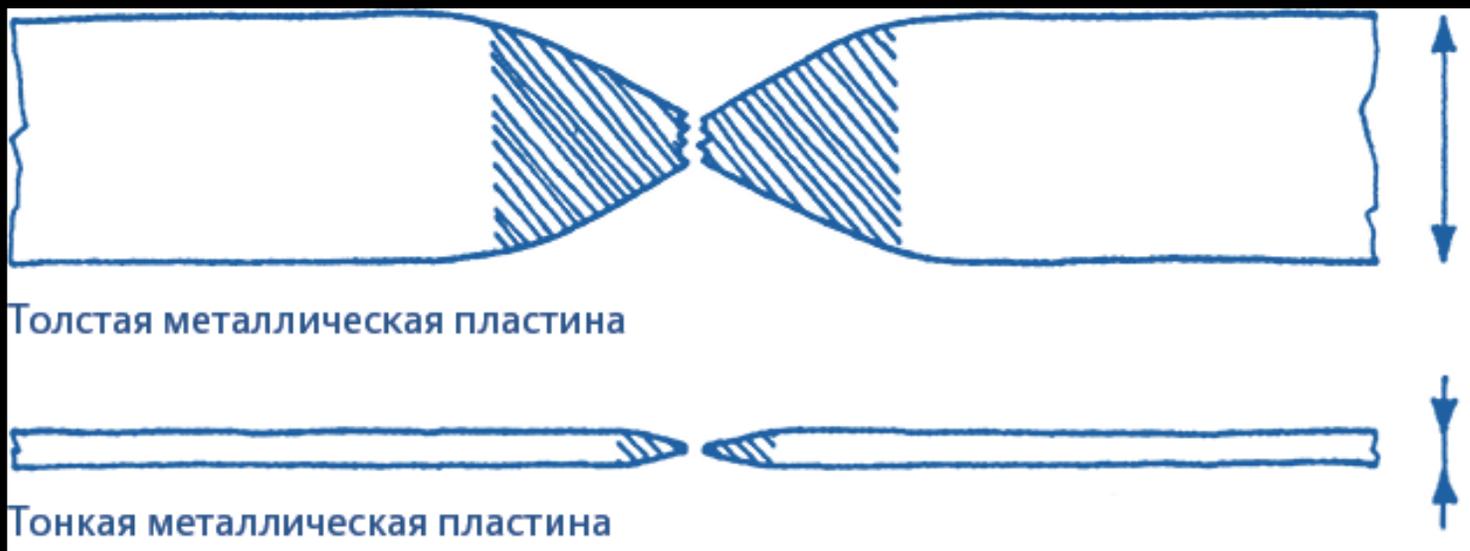
- Типичная кривая напряжения-деформации пластичного металла, например мягкой низкоуглеродистой стали. Закрашенная область обозначает работу разрушения материала



ОБРАЗОВАНИЕ «ШЕЙКИ» ПЕРЕД РАЗРЫВОМ

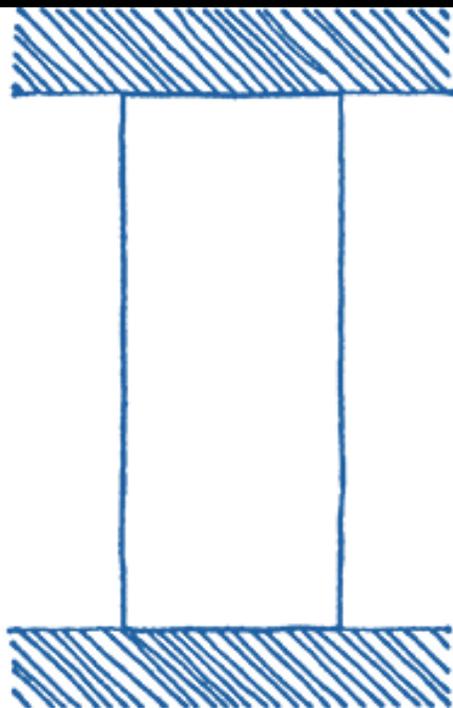
Работа разрушения прямо пропорциональна объему пластически деформируемого материала (закрашенная область).

Поэтому работа разрушения тонкой металлической пластины может быть очень низкой...

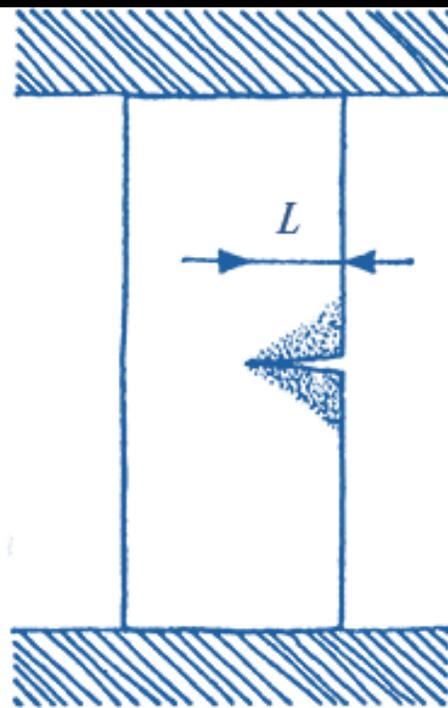




Образец
не деформи-
рован



Образец деформирован
в растяжении и жестко
закреплен с обоих концов,
система не может получить
или отдавать энергию



В образце образуется трещина.
В выделенных областях высво-
бождается энергия деформа-
ции, которая расходуется
на расширении трещины

Диаграмма растяжения образца малоуглеродистой стали

А

