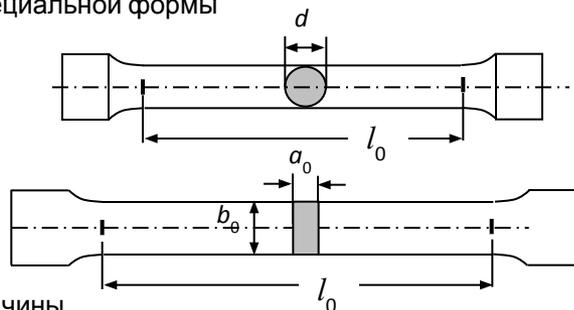
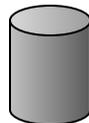


# Лекция 6

■ **Испытание материалов на растяжение – сжатие** – При проектировании конструкций, машин и механизмов необходимо знать прочностные и деформационные свойства материалов. Их определяют экспериментально на специальных испытательных машинах. Из всех прочих свойств (твёрдость, сопротивляемость ударным нагрузкам, противодействие высоким или низким температурам и т.п.) основными является сопротивление на растяжение и сжатие, дающие наибольшую и важнейшую информацию о механических свойствах металлов.

■ **Испытание на растяжение** – проводят на разрывных или универсальных машинах, имеющих специальные захваты для передачи усилия. Используются стандартные образцы специальной формы ( $l_0$  – длина рабочей части,  $l_0/a_0 = 5$  – короткие,  $l_0/a_0 = 10$  – длинные):

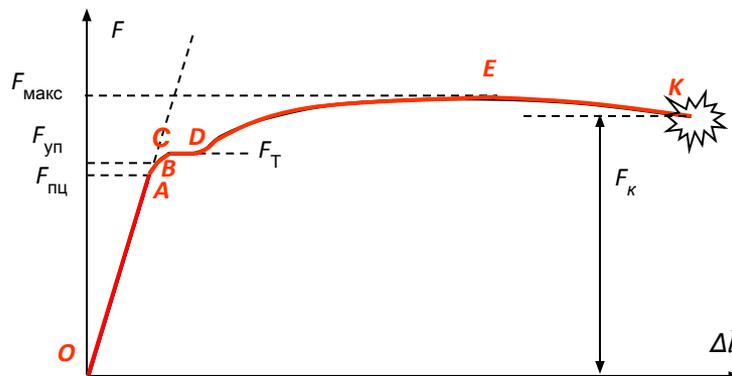
При испытаниях на сжатие применяются цилиндрические образцы с отношением высоты к диаметру  $h/d = 1,5 - 3$ . Образцы устанавливаются на опорную поверхность с использованием смазки для ослабления влияния сил трения.



Все машины снабжены устройством для автоматической записи в определенном масштабе диаграммы-графика зависимости величины растягивающей силы от удлинения образца.

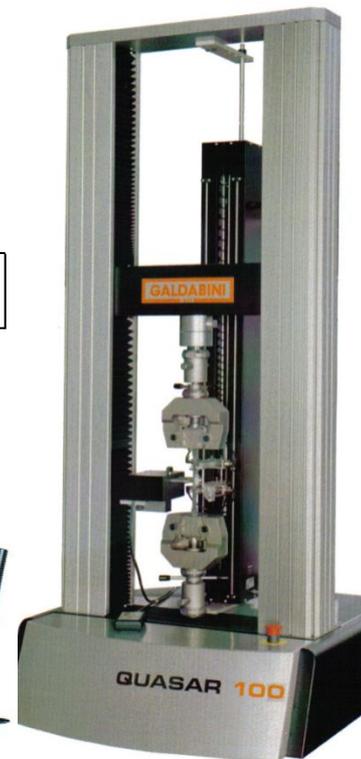
Современные машины компьютеризированы и имеют средства управления процессом нагружения по различным задаваемым программам, вывода данных на экран и сохранения их в файлах для последующей обработки:

■ **Диаграммы растяжения пластичных и хрупких материалов** – Характерной диаграммой пластичных материалов является диаграмма растяжения *низкоуглеродистой стали* ( $< 0,25\% C$ ):

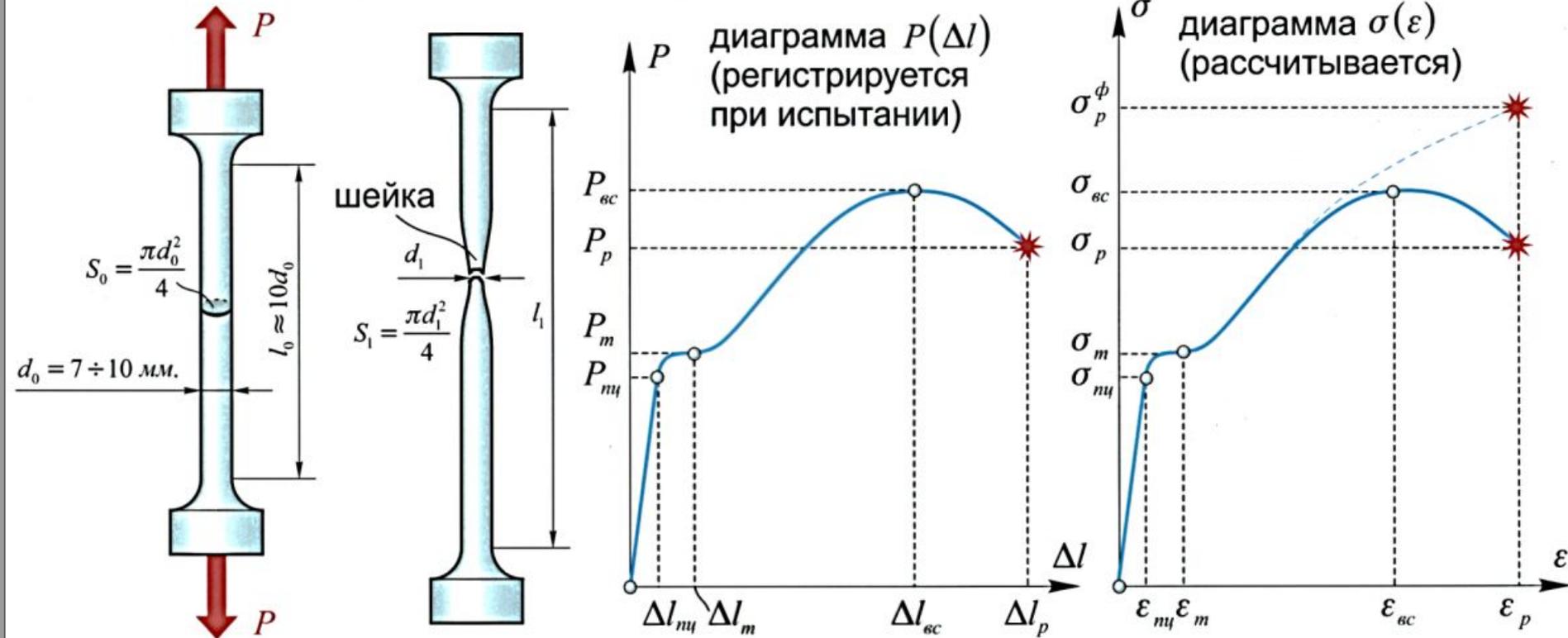


**В точке K образец внезапно разрушается** с резким ударным звуком, но без световых эффектов.

1. В начальной стадии (OA, до  $F_{пц}$ ) нагружения удлинение растёт *прямопропорционально* величине нагрузки (на этой стадии справедлив закон Гука).
2. Далее (AB, до  $F_{уп}$ ) деформации начинают расти чуть быстрее и не линейно, но остаются малыми и *упругими* (исчезающими после снятия нагрузки).
3. При дальнейшем нагружении (BC, до  $F_{Т}$ ) криволинейная часть переходит в горизонтальную площадку CD, на которой деформации растут без увеличения нагрузки (*текучесть*). Зона BCD – зона *общей текучести*.
4. При дальнейшем нагружении (DE, до  $F_{макс}$ ) изменяется структура металла и материал вновь может воспринимать возрастание нагрузки (*упрочнение*) вплоть до максимальной.
5. Далее (EK, до  $F_{к}$ ) в наиболее слабом месте возникает и развивается локальное уменьшение поперечного сечения (*шейка*). Зона EK – зона *местной текучести*.



# Испытание на растяжение



Свойства материала описываются величинами:

предел (напряжение) пропорциональности (упругости)  $\sigma_{nc} = \frac{P_{nc}}{S_0}$ ;

предел текучести  $\sigma_m = \frac{P_m}{S_0}$ ; предел временного сопротивления  $\sigma_{sc} = \frac{P_{sc}}{S_0}$ ;

напряжение разрыва (условное)  $\sigma_p = \frac{P_p}{S_0}$ ; фактическое:  $\sigma_p^\phi = \frac{P_p}{S_1}$ .

Деформации:

остаточная (необратимая):

$$\epsilon_{nl} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

пропорциональности (упругая):

$$\epsilon_{nc} = \frac{\Delta l_{nc} - (l_1 - l_0)}{l_0}$$

# Лекция 6 (продолжен – 6.2)

**Характеристики прочности и пластичности** – Рассмотренная только что диаграмма растяжения, связывающая нагрузку с удлинением не может непосредственно характеризовать прочность и пластичность материала, поскольку нагрузка зависит от площади поперечного сечения образца, а удлинение – от базовой его длины. Для получения объективных механических характеристик материала, не зависящих от сечения и длины образца, необходимо перейти к напряжениям и относительным удлинениям. Для этого нагрузка делится на начальную или текущую площадь поперечного сечения образца, а по оси абсцисс откладывается соответствующее относительное удлинение для каждой их характерных точек.

В результате получается *диаграмма напряжений*, подобная диаграмме растяжения:

В этой диаграмме характерные точки определяют следующие механические свойства материала:

- Предел пропорциональности  $\sigma_{пц}$**  – наибольшее напряжение, до которого существует пропорциональная зависимость между нагрузкой и деформацией (для Ст3  $\sigma_{пц} = 195-200$  МПа).
- Предел упругости  $\sigma_{уп}$**  – наибольшее напряжение, при котором в материале не обнаруживаются признаков пластической (остаточной) деформации (для Ст3  $\sigma_{уп} = 205-210$  МПа).
- Предел текучести  $\sigma_T$**  – наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки (для Ст3  $\sigma_T = 220-250$  МПа).

$$\sigma_{пц} = \frac{F_{пц}}{A_0}$$

$$\sigma_{уп} = \frac{F_{уп}}{A_0}$$

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}$$

**Предел прочности или временное сопротивление  $\sigma_B$**  – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению (для Ст3  $\sigma_B = 370-470$  МПа).

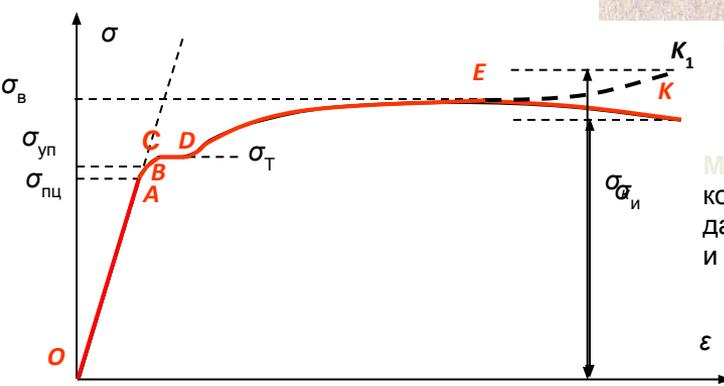
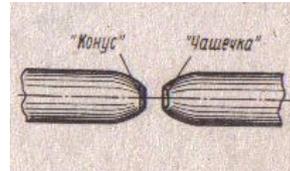
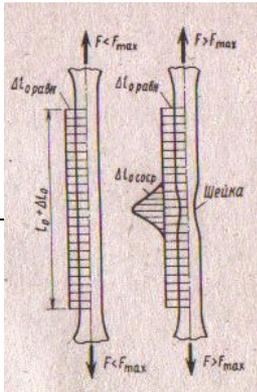
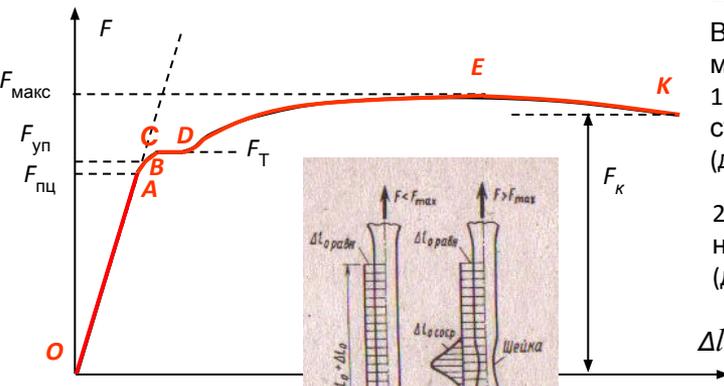
$$\sigma_B = \frac{F_{макс}}{A_0}$$

**Предел прочности или истинное сопротивление разрыву  $\sigma_{и1}$**  – соответствующее разрушающей силе  $F_{K'}$ , вычисленное для площади поперечного сечения образца в месте разрыва  $A_1$  (для Ст3  $\sigma_{и1} = 900-1000$  МПа). Поскольку на участке *EK* образуется шейка и площадь поперечного сечения быстро уменьшается, напряжение увеличивается ( $EK_1$ ) при регистрируемом падении усилия.

$$\sigma_{и1} = \frac{F_{K'}}{A_1}$$

**Механизм разрушения:** в области шейки образуются мелкие продольные трещины, которые затем сливаются в одну центральную трещину, перпендикулярную оси растяжения, далее трещина распространяется к поверхности шейки, разворачиваясь примерно на  $45^\circ$ , и при выходе на поверхность образует коническую часть излома.

В результате получается поверхность излома в виде “конуса” и “чашечки”. Стадия образования конической поверхности показывает, что материал в вершине трещины  $\epsilon$  начинает разрушаться по механизму скольжения (по площадкам максимальных касательных напряжений), характерному для хрупких материалов.





# Лекция 6 (продолжен – 6.3)

**Характеристики пластичности** – Пластичность материала является важным механическим свойством материала при его сопротивлении переменным динамическим нагрузкам, а также технологическим свойством при его обработке (штамповка и др.).

К характеристикам пластичности относятся:

1. **Относительное удлинение после разрыва  $\delta$  (%)** – отношение приращения расчетной длины образца после разрыва к ее первоначальному значению (для Ст3  $\delta = 25-27\%$ ).

$$\delta = \frac{\Delta l_K}{l_0} 100\% = \frac{l_K - l_0}{l_0} 100\%.$$

2. **Относительное сужение после разрыва  $\psi$  (%)** – отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения (для Ст3  $\psi = 60-70\%$ ).

$$\psi = \frac{\Delta A_K}{A_0} 100\% = \frac{A_K - A_0}{A_0} 100\%.$$

**Идеализированные диаграммы** – При решении статически неопределимых задач рассматривается физическая сторона задачи, в которой необходимо иметь аналитическую зависимость между напряжениями и деформациями. Такую зависимость,

**Удельная потенциальная энергия** (на ед. объема) характеризует способность поглощения механической энергии при деформации (вязкость) материала ( $V$  – объем стержня):

$$u = \frac{U}{V} = \frac{N^2 l}{2EA} \cdot \frac{1}{Al} = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} = \frac{1}{2} \frac{\sigma(E\varepsilon)}{E} = \frac{1}{2} \sigma\varepsilon.$$

Таким образом, удельная потенциальная энергия численно равна площади треугольника на диаграмме напряжений ( в пределах соблюдения закона Гука).

**Потенциальная энергия деформации** – Эта величина характеризует способность материала совершить работу при переходе его из деформированного состояния в исходное. При деформации внешние силы совершают работу  $W$ , которая превращается в потенциальную энергию внутренних упругих сил  $U$  (например, при сжатии пружины). При снятии нагрузки внутренние силы возвращают материал в исходное (недеформированное) состояние (пружина распрямляется).

Таким образом, для *упругих* материалов процесс полностью обратим:  $U = W$ .

При *статическом* растяжении образца силой  $F$  элементарная работа на малом перемещении равна:  $dW = Fd\Delta l$ .

Полная работа равна:

$$W = \int_0^{\Delta l} Fd\Delta l. \quad \text{- площадь, ограниченная кривой растяжения}$$

В пределах соблюдения закона Гука потенциальная энергия деформации равна:

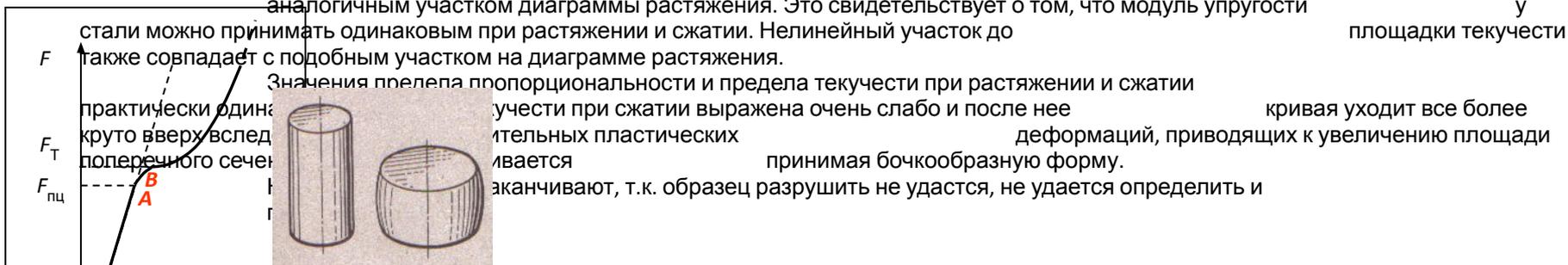
$$U = W = \frac{1}{2} F\Delta l = \frac{1}{2} F \left( \frac{Fl}{EA} \right) = \frac{F^2 l}{2EA}.$$

В случае переменной величины продольной силы и/или площади поперечного сечения по длине стержня:

$$dU = \frac{F^2 dz}{2EA} \quad \Rightarrow \quad U = \int_0^l \frac{N^2 dz}{2EA}.$$

# Лекция 7

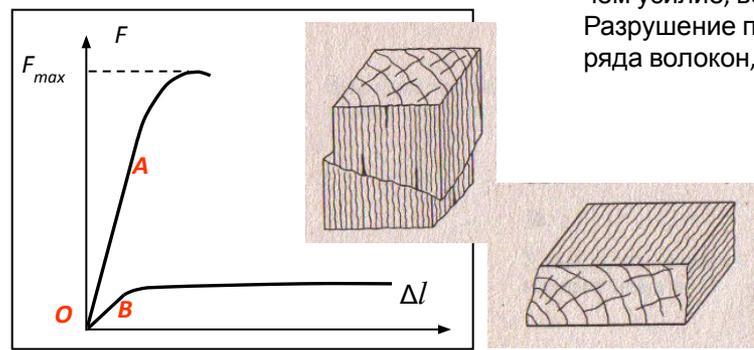
- **Диаграммы сжатия различных материалов** – При сжатии поведение материала образца отличается от его поведения при растяжении.
- **Диаграмма низкоуглеродистой стали** – Начальный участок диаграммы является прямолинейным ( до точки А) и совпадает с аналогичным участком диаграммы растяжения. Это свидетельствует о том, что модуль упругости у



- **Диаграмма чугуна** – Начальный участок диаграммы имеет почти линейную зависимость, на этом участке форма и размеры образца меняются незначительно. При приближении к максимальной нагрузке кривая становится более полой и образец принимает слегка бочкообразную форму. При достижении нагрузкой наибольшего значения появляются трещины под углом примерно  $45^\circ$  и наступает разрушение по площадкам с наибольшими касательными напряжениями (хрупкое разрушение). Другие хрупкие материалы (камень, бетон) имеют подобную диаграмму и такой характер разрушения. Хрупкие материалы сопротивляются сжатию значительно лучше, чем растяжению, например, предел прочности серого чугуна на сжатие 560-900 МПа, а на растяжение – 120-190 МПа.

- **Диаграмма древесины** – Древесина – анизотропный материал. Сопротивляемость при сжатии зависит от расположения волокон относительно направления сжимающей силы. При сжатии *вдоль волокон* на участке *OA* древесина работает почти упруго, деформации растут пропорционально увеличению сжимающей силы. Далее деформации начинают расти более быстро, чем усилие, вследствие возникновения пластических деформаций в отдельных волокнах. Разрушение происходит при максимальной нагрузке в результате потери местной устойчивости ряда волокон, сопровождаемой сдвигом с образованием продольных трещин.

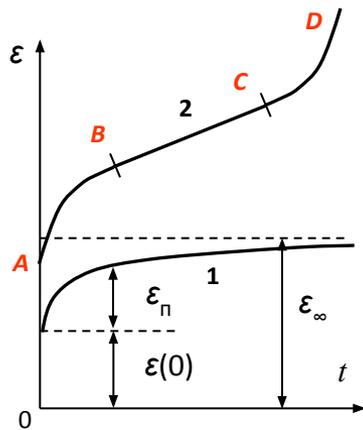
При сжатии *поперек волокон* на участке *OB* древесина работает почти упруго, деформации растут пропорционально увеличению сжимающей силы. Далее деформации начинают расти очень быстро при малом увеличении силы, вследствие уплотнения (спрессовывания) отдельных волокон. При наличии сучков и других пороков (трещин) образец может разрушиться раскалыванием. Разрушающая нагрузка определяется условно при достижении деформации сжатия, при которой высота образца уменьшается на треть исходной высоты .



## Лекция 7 (продолжен – 7.2)

**Понятия о ползучести и релаксации** – Многие строительные конструкции при эксплуатации деформируются при длительном действии постоянных нагрузок. Это обуславливается *способностью материалов деформироваться во времени при действии постоянных нагрузок*, называемой *ползучестью*.

Ползучесть присуща таким материалам, как кирпич, древесина, полимеры, камень, резина, грунты и т.п. Металлы также обнаруживают ползучесть при высоких температурах, а цветные металлы – и при обычной (комнатной) температуре. Ползучесть может возникать и при малых нагрузках, которые при кратковременном действии вызывают только упругие деформации.



Результаты испытаний на ползучесть представляются графиками изменения деформаций во времени (*кривые ползучести*). В начальный момент времени деформации имеют ненулевое значение  $\epsilon(0)$ , равное упругой деформации или сумме упругой и пластической деформаций. Считается, что время предварительной нагрузки (или разгрузки) пренебрежимо мало по сравнению со временем выдерживания нагрузки, поэтому можно принять, что деформации  $\epsilon(0)$  и напряжения появляются как бы мгновенно.

При определении характера процесса ползучести анализируется *скорость деформации*, вычисляемая как *производная по времени*.

Если скорость деформации монотонно уменьшается со временем, то деформация ползучести стремится к некоторому пределу (кривая 1). Это характерно, например, при деформациях, связанных с уплотнением материала с течением времени под нагрузкой (осадка грунта под фундаментом, бетон).

Ползучесть, представленная кривой 2, характеризуется на первом участке (AB) уменьшением скорости деформации, соответствующей обжатию локальных зон, на втором участке (BC) стабилизацией скорости деформации (установившаяся ползучесть). Для хрупких материалов в точке C испытание заканчивается хрупким разрушением, для пластичных материалов – вязким разрушением с образованием локальных пластических деформаций (третий участок CD, на котором возрастает скорость деформации).

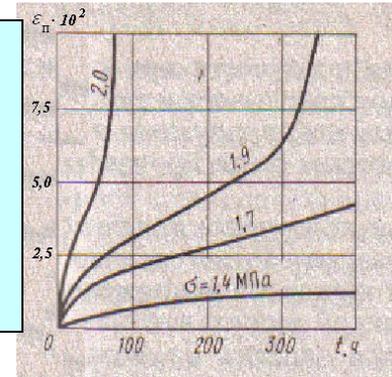
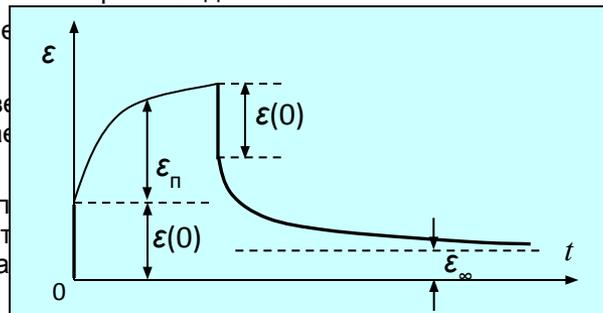
Интересно заметить, что кривой типа 2 описывается процесс накопления повреждений, в том числе износа, в механике разрушения, диагностике и материаловедении.

Характер ползучести зависит от действующих напряжений. Например, может иметь кривые ползучести как типа 1, так и типа 2 [1].

Если деформации ползучести увеличиваются пропорционально увеличению напряжений (при малых напряжениях), то ползучесть – *линейная*, в противном случае – *нелинейная*.

В некоторых материалах (бетон, пластмассы, каучук) происходят длительные химические или окислительные процессы, в результате которых материал теряет свои свойства, так называемое “старение”. В таких материалах деформация ползучести увеличивается со временем.

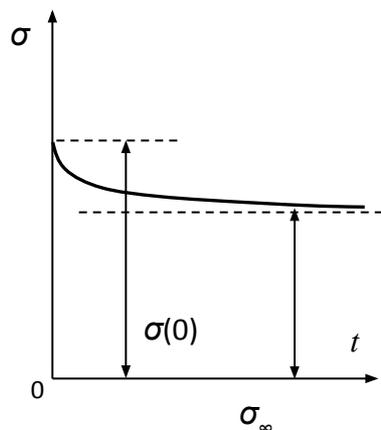
При снятии нагрузки упругая часть деформаций материала исчезает, накопленная деформация ползучести начинает уменьшаться, асимптотически стремясь к некоторому пределу, подобно перевернутой кривой 1. Такое явление носит название *обратной ползучести*. Если при неограниченном увеличении времени образец полностью восстанавливает свои первоначальные размеры, то это явление называется *упругим последствием*.





## Лекция 7 (продолжен – 7.3)

**Релаксация напряжений** – Если образец выдерживается в течении некоторого длительного времени в состоянии, при котором деформация остается постоянной, то напряжения в материале, имевшие в начальный момент значение  $\sigma(0)$ , *снижаются* асимптотически до некоторого значения. *Явление медленного уменьшения напряжений в образце при постоянной деформации* называется **релаксацией**.



Таким образом, явление *релаксации* в некоторой степени обратное *ползучести*, но природа этих двух явлений одна – энергия тепловых упругих колебаний атомов добавляется к энергии, обеспечивающейся внешними силами, вызывающими деформацию.

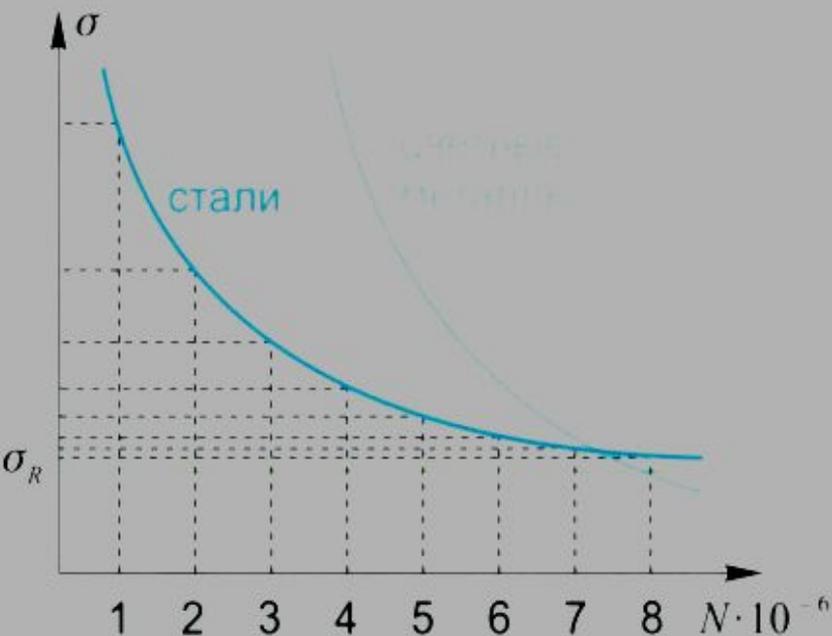
При свободной деформации под действием приложенных сил происходит дополнительное движение дислокаций (*дислокации* – дефекты кристаллической решетки) и деформация прирастает. Поскольку при обыкновенной температуре эта энергия незначительна, то ползучесть (прирост деформации) происходит в этом случае медленно.

При постоянной деформации поступление дополнительной энергии тепловых колебаний атомов приводит к перераспределению дислокаций с частичным восстановлением регулярности кристаллической решетки. При этом энергия деформации уменьшается, что приводит к уменьшению напряжений, если деформация остается постоянной.



Результат в терминах сопротивления материалов и означает релаксацию. Многие предпочитают другое вместо молока.

# Сопротивление материалов. Прочность при переменных нагрузках



Прочность при переменных напряжениях определяется по кривой усталости материала, координатами точек которой являются число выдерживаемых образцом материала циклов (абсцисса) при уровне напряжений в соответствии с параметром цикла (ордината).

Наиболее простыми являются испытания при симметричном цикле, осуществляемые вращением образца относительно груза определенного веса.

Материалы на основе железа (стали) обычно имеют **асимптоту** кривой усталости.

$\sigma_R$  — предел выносливости.

Достаточным числом испытаний (базой испытаний) считается  $N_0 = 10^7$ .

При отсутствии асимптоты кривой усталости назначают  $\sigma_R$  при  $N_0 = 10^8$ .

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \text{ — параметр цикла.}$$

