

# ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*(Лысенко Е.А.)*

## ***Лекция № 2.***

***Механические***

***характеристики полимерных  
материалов.***

## ***2.1. Виды деформаций полимеров. Жесткость.***

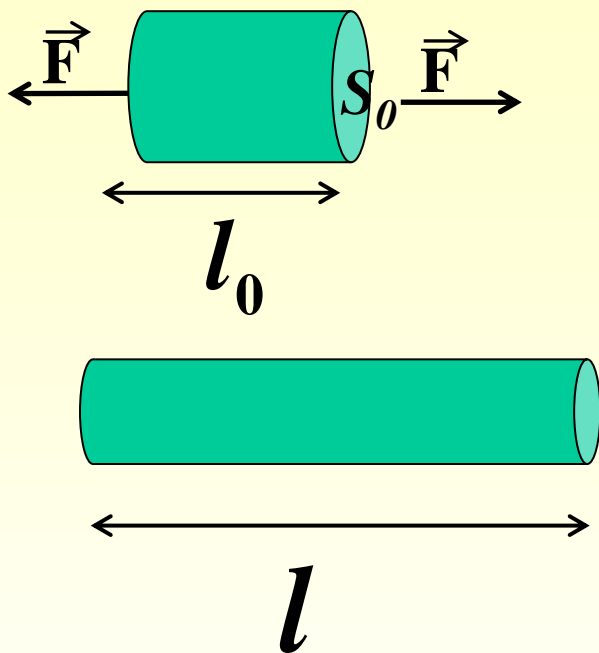
**Деформация** – (от лат. *deformatio* — «искажение») изменение взаимного положения частиц тела, связанное с их перемещением относительно друг друга под действием внешней механической силы. На макроуровне деформация проявляется в изменении формы и объёма тела.



*Сила действует нормально (перпендикулярно к поверхности)*

# Что такое деформация (одноосного) растяжения?

4



*Деформация одноосного растяжения*

$l_0$  – начальная длина образца;

$l$  – длина деформированного образца;

$F$  – приложенная сила;

$S_0$  – начальная площадь поперечного сечения недеформированного образца;

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

$\varepsilon$  (деформация) - это относительное удлинение; безразмерная величина, часто умножают на 100 и выражают в %.

$\sigma$  (напряжение) - это сила, приходящаяся на единицу площади поперечного сечения исходного образца;  
единица измерения – Паскаль (Па);  $1 \text{ Па} = \text{Н/М}^2$  (1 ньютон на 1 квадратный метр)

# Как можно классифицировать виды деформаций по отклику материала?

5

Деформации

Обратимые

Тело полностью восстанавливает исходную форму и размеры после снятия нагрузки



Упругие (Гуковские)

Развиваются «мгновенно», подчиняются закону Гука ( $E$  – модуль Юнга)

$$\sigma = E\varepsilon$$

Высокоэластичные

Характерны только для полимеров в высокоэластичном состоянии ( $T > T_g$  или  $T > T_{nl}$ ) Развиваются во времени, связана с разворачиванием клубков

Необратимые

Тело не восстанавливает исходную форму и размеры после снятия нагрузки, остается в деформированном состоянии

Вынужденно эластичные

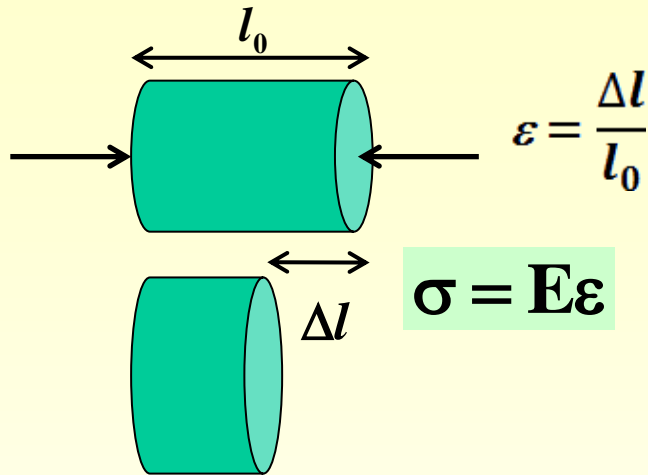
Характерны только для полимеров в стеклообразном ( $T < T_g$ ) или кристаллическом ( $T < T_{nl}$ ) состоянии. При нагревании выше  $T_g$  (или  $T_{nl}$ ) полностью исчезают

Пластичные (холодное течение)

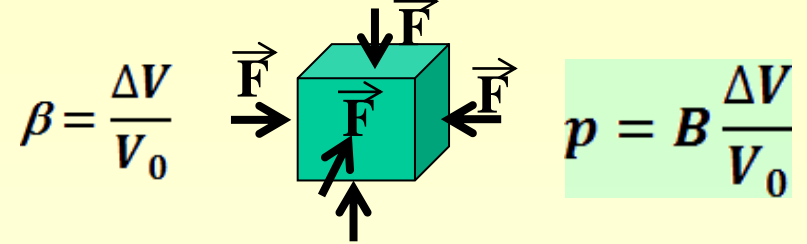
Связаны со с необратимым смещением центров тяжести молекул друг относительно друга без нарушения сплошности тела. При нагревании не исчезают

# Как определяются другие виды деформации?

Деформация одностороннего сжатия



Деформация всестороннего сжатия



$V_0$  – начальный объём образца;

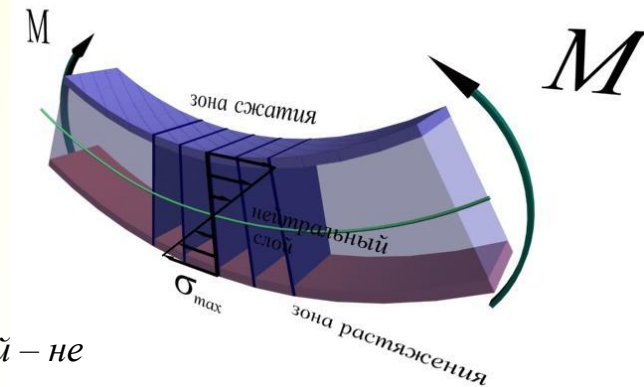
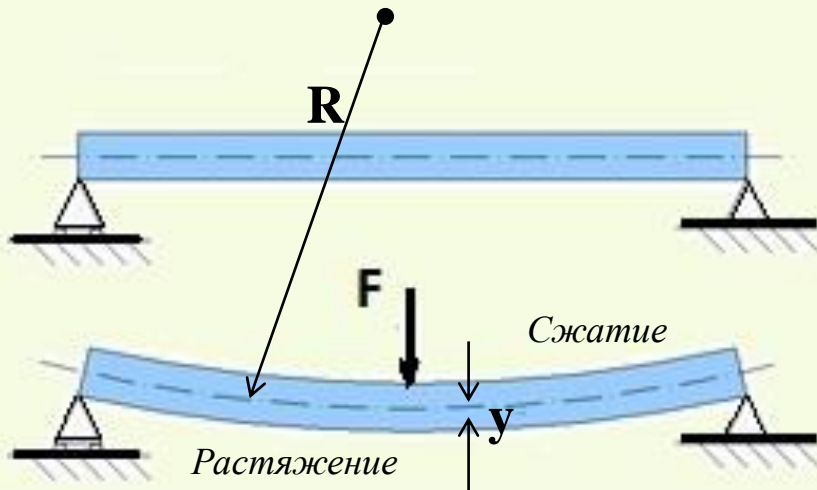
$V$  – объём деформированного образца;

$\beta$  – объёмное сжатие;

$p$  – давление в образце;

$B$  – модуль объёмной упругости;

Деформация изгиба

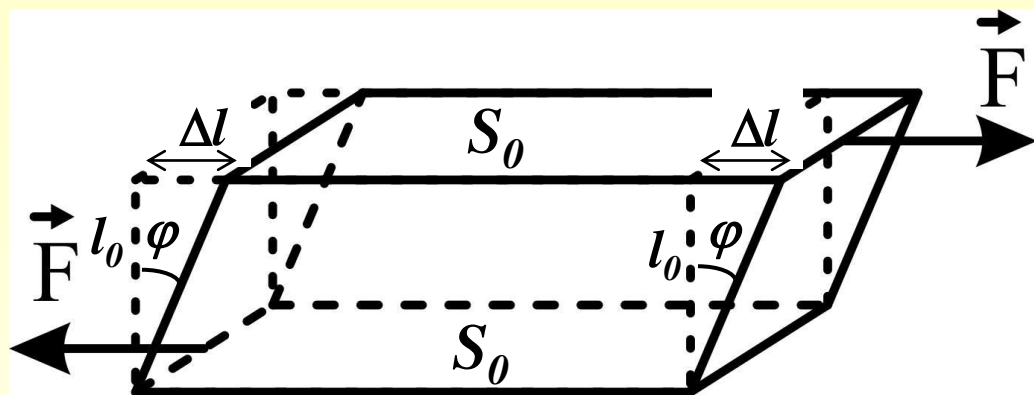


Нейтральный слой – не растягивается и не сжимается

$R$  – радиус кривизны нейтрального слоя;  $y$  – расстояние от нейтрального слоя до выбранной точки;

# Как определяются другие виды деформации?

Деформация сдвига (среза)

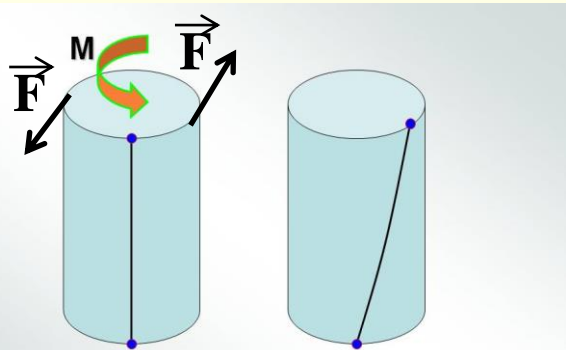


$$\tau = \frac{F}{S_0} \quad \gamma = \frac{\Delta l}{l_0} = \operatorname{tg} \varphi$$

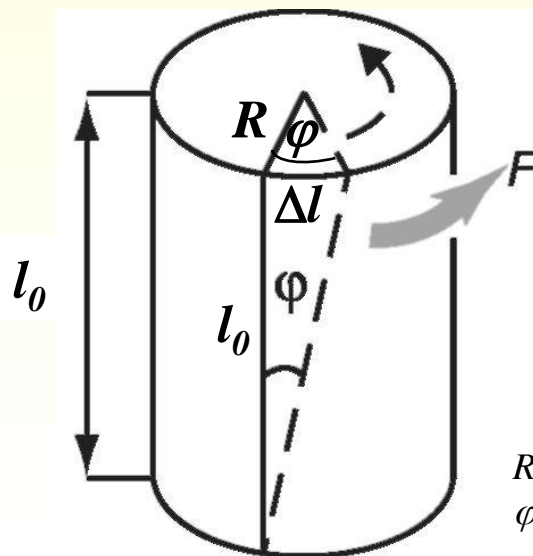
$$\tau = G \frac{\Delta l}{l_0} = G \gamma$$

$\tau$  – напряжение сдвига (направлено по касательной к поверхности);  
 $\gamma$  – деформация сдвига;  
 $G$  – модуль сдвига

Деформация кручения



При чистом кручении форма не меняется, но перемещение есть



$$\gamma = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{R \varphi}{l_0}$$

$$\tau = G \gamma = G \frac{R \varphi}{l_0}$$

$R$  – расстояние от оси вращения;  
 $\varphi$  – угол закручивания

**Жесткость** – это способность материала сопротивляться образованию деформаций. Чем жестче материал, тем менее он деформируем.

*Если материал подчиняется закону Гука, то количественными критериями жесткости являются модули упругости: модуль Юнга (E), модуль сдвига (G) и модуль объёмного сжатия (B). Чаще всего жёсткость материалов сравнивается через сравнение модулей Юнга.*

Алмаз –  $E \sim 10^{12}$  Па;

Металлы –  $E \sim 10^{11}$  Па;

Кварц –  $E \sim 10^{11}$  Па;

Стекло -  $E \sim 10^{10}$  Па

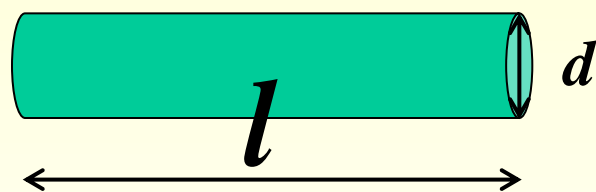
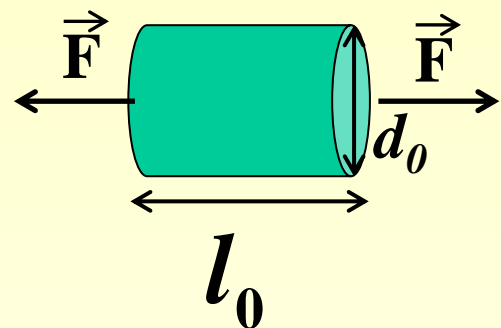
Пластмассы –  $E \sim 10^9$  Па;

Каучуки –  $E \sim 10^5 - 10^7$  Па;

Газы –  $E \sim 10^5$  Па.



## Есть ли связь между различными модулями упругости для одного и того же материала?



$$\mu = \frac{\frac{d_0 - d}{d_0}}{\frac{l - l_0}{l_0}} = \frac{\frac{\Delta d}{d_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{\varepsilon_{\text{поперечная}}}{\varepsilon_{\text{продольная}}} = \text{const}$$

**Коэффициент Пуассона ( $\mu$ )** - отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному удлинению. Для данного материала – постоянная величина. Для несжимаемого упругого тела  $\mu = 0.5$ . Для реальных тел справедливо неравенство:  $0 < \mu < 0.5$

Модули упругости при различных деформационных испытаниях связаны друг с другом через коэффициент Пуассона

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad B = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}$$

Таким образом, модуль Юнга ( $E$ ) и коэффициент Пуассона ( $\mu$ ) полностью характеризуют упругие свойства изотропного материала

***2.2. Одноосное растяжение  
полимерных тел и его  
характеристики.***

## Электромеханическая разрывная машина

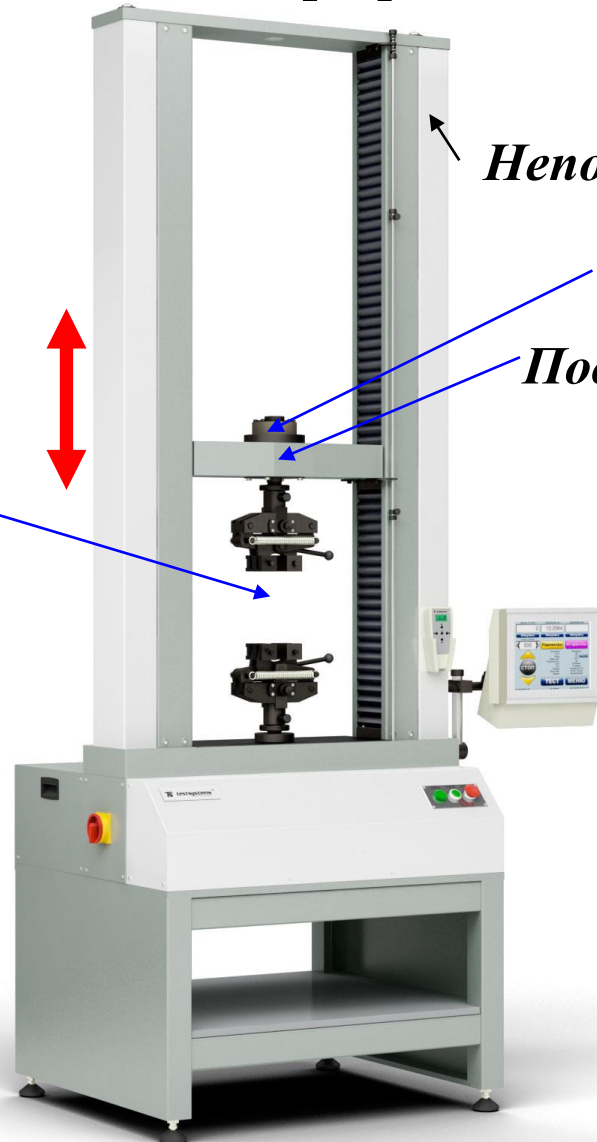
Зажимы с образцом



Неподвижная станина

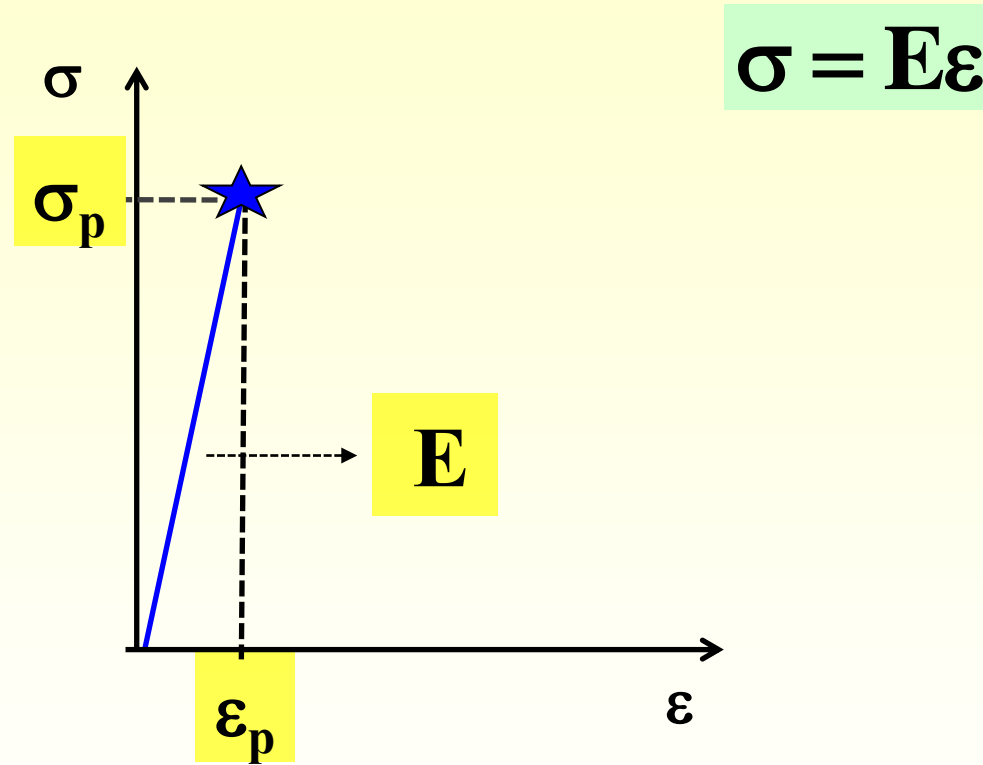
Динамометр

Подвижная траверса



**Как выглядит кривая одноосного растяжения для хрупкого (Гуковского) тела: полимера в стеклообразном или кристаллическом состоянии ниже температуры хрупкости?**

12



*Хрупкое состояние – состояние, которое следует избегать*

## Какую информацию о твёрдом теле содержит кривая напряжение - деформация?

$\sigma_p$  - предел прочности (разрывное напряжение) – предельное напряжение, которое тело выдерживает без разрушения.

$\varepsilon_p$  - разрывная деформация - предельно возможная деформация тела без его разрушения.

$E$  – модуль Юнга - тангенс угла наклона зависимости  $\sigma$  ( $\varepsilon$ ).

$$\sigma d\varepsilon = \frac{f}{S_0} \frac{dl}{l_0} = \frac{dA}{V_0} \Rightarrow \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \frac{A}{V_0}$$

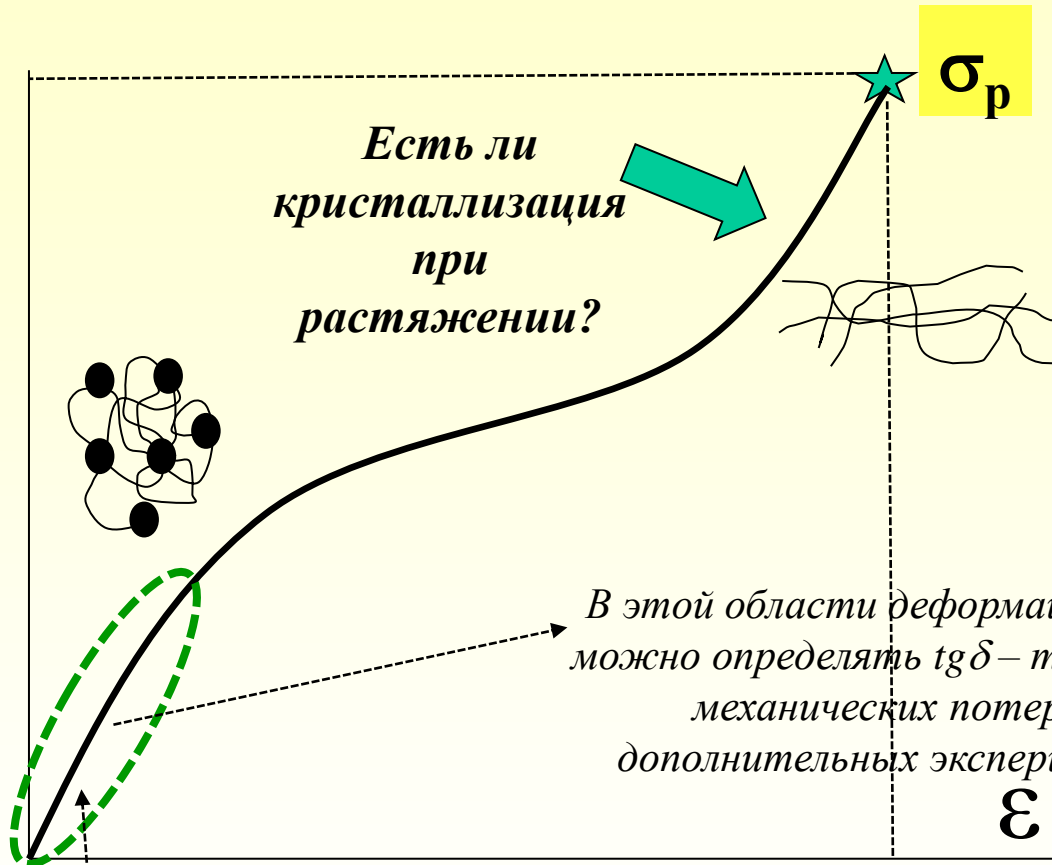
$f$  - сила упругости;  $l_0$  – первоначальная длина образца;  $S_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения образца;  $V_0$  – объём образца,  $A$  – работа, затраченная на деформацию образца

**Площадь под кривой  $\sigma(\varepsilon)$  -  $\varepsilon$  есть работа (энергия) затраченная на деформацию единичного объема физического тела.**

# Как выглядит кривая одноосного растяжения для полимера в высокоэластическом состоянии?

14

$\sigma$



**E**

$E$  – модуль Юнга  
каучука – оценивается  
из первоначального  
наклона кривой  $\sigma(\epsilon)$

**$\epsilon_p$**

**$\sigma_p$**

$\sigma_p$  – разрушающее  
(разрывное)  
напряжение;  
 $\epsilon_p$  – деформация при  
разрыве.

$\epsilon$

# Что такое тангенс угла механических потерь и что он характеризует?

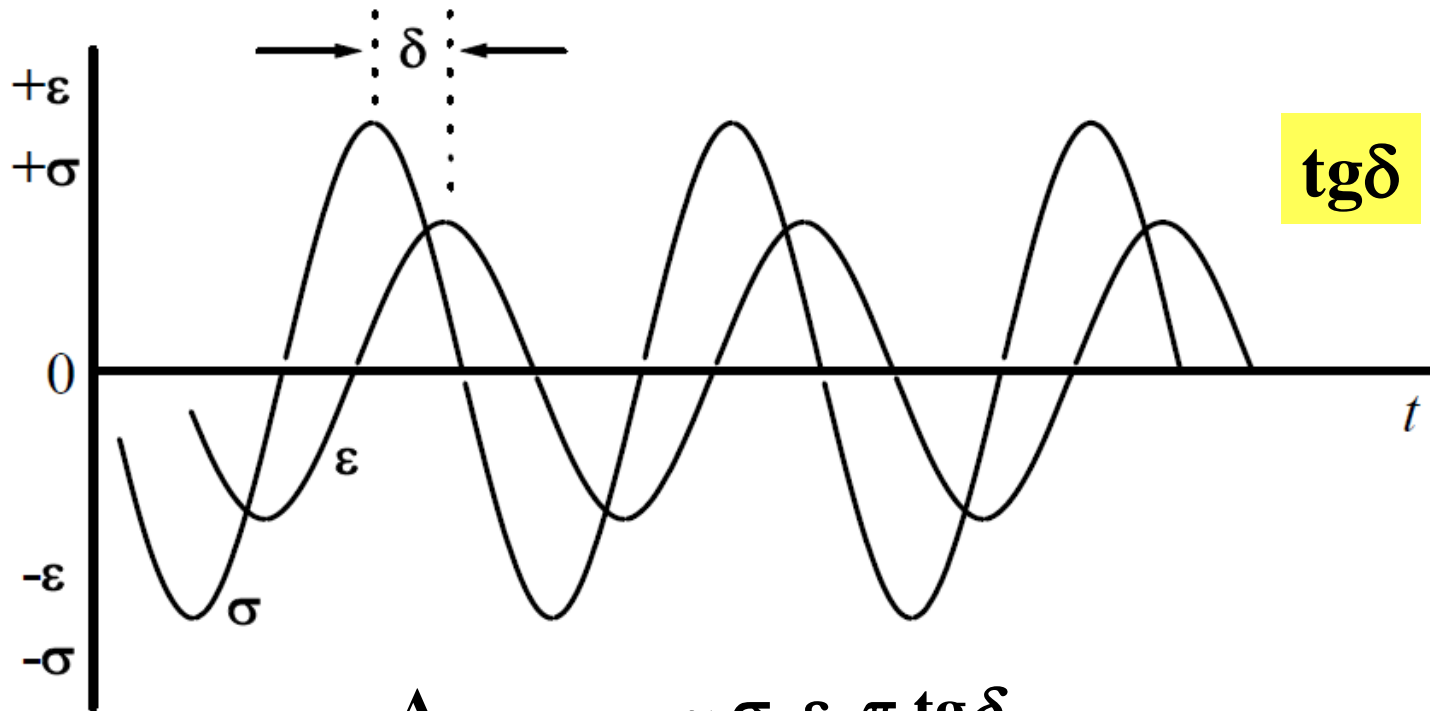
15

Вязкоупругое тело:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t - \delta)$$

$$0 < \delta < \frac{\pi}{2}$$

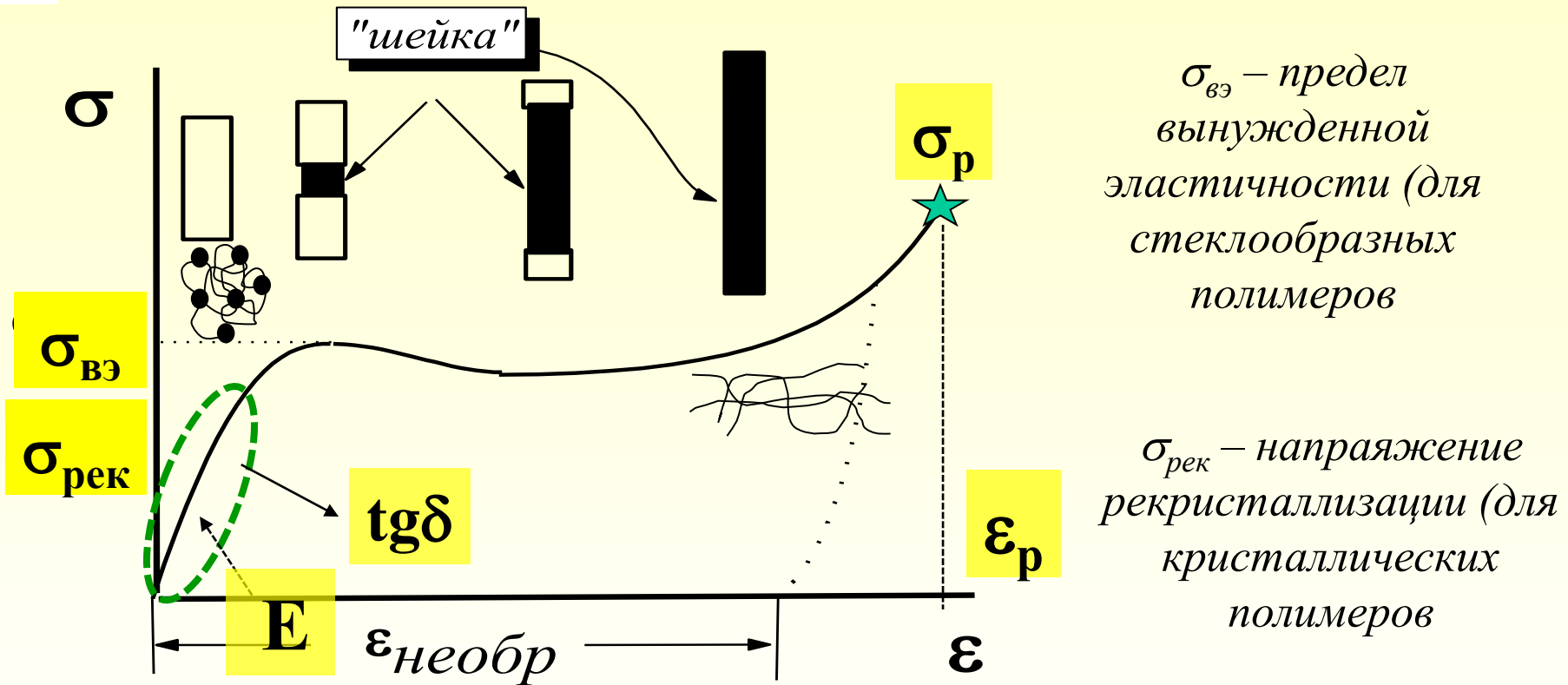


$$A_{\text{потерянная}} \sim \sigma_0 \varepsilon_0 \pi \text{tg}\delta$$

Тангенс угла механических потерь  $\text{tg}\delta$  (при выбранной частоте  $\omega$  и температуре) – характеризует способность полимера рассеивать механическую энергию в форме теплоты

# Как выглядит кривая одноосного растяжения для полимера в стеклообразном или кристаллическом состоянии выше температуры хрупкости?

16



$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{вэ}}$  (для аморфных полимеров) или  $\sigma_{\text{рек}}$  (для кристаллических)

Величина  $\sigma_{\text{пр}}$  характеризует **прочность** – способность материала сопротивляться разрушению (потере целостности), а также необратимому изменению формы под действием внешних нагрузок.



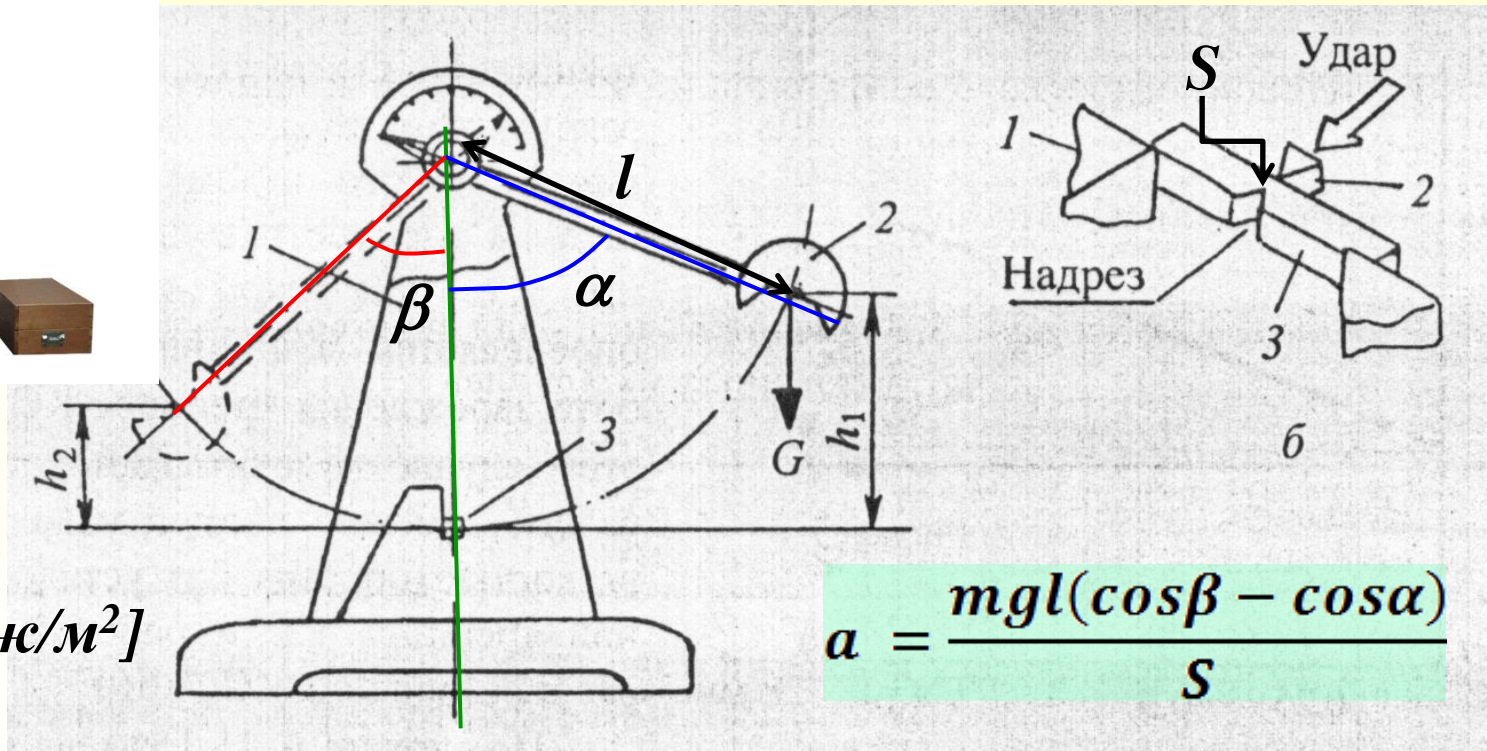
## ***2.3. Ударная вязкость (прочность).***

# Как количественно оценить хрупкость материала (сопротивляемость удару)?

## 18

Это можно сделать, оценив работу разрушения образца при ударе, делённую на площадь поперечного сечения образца в месте надреза. Эта удельная работа получила название ударной вязкости или ударной прочности (обозначается буквой  $a$ ).

Маятниковый копр



$$[a] = [\text{Дж}/\text{м}^2]$$

$$a = \frac{mgl(\cos\beta - \cos\alpha)}{S}$$

$m$  – масса маятника;  $l$  – радиус маятника;  $S$  – площадь поперечного сечения в месте надреза;  $\alpha$  – угол заведения маятника;  $\beta$  – угол подъёма маятника после удара.

## 19 **Какие значения ударной вязкости характерны для полимеров?**

Полипропилен –  $\varepsilon_p = 400-800\%$ ,  $a = 80$  кДж/м<sup>2</sup>;

$T = 20 - 25^\circ\text{C}$

Полистирол –  $\varepsilon_p = 1-3\%$ ,  $a = 2-3$  кДж/м<sup>2</sup>;

Поливинилхлорид –  $\varepsilon_p = 10-50\%$ ,  $a = 70-150$  кДж/м<sup>2</sup>;

Политетрафторэтилен -  $\varepsilon_p = 250-500\%$ ,  $a = 100$  кДж/м<sup>2</sup>;

Полиэтилентерефталат -  $\varepsilon_p = 80-130\%$ ,  $a = 90$  кДж/м<sup>2</sup>;

Полиамиды -  $\varepsilon_p = 100-250\%$ ,  $a = 100-140$  кДж/м<sup>2</sup>;

Фенолформальдегидные смолы  $\varepsilon_p \sim 1\%$ ,  $a = 2.5-5$  кДж/м<sup>2</sup>;

Полиметилметакрилат -  $\varepsilon_p = 2-3\%$ ,  $a = 14-30$  кДж/м<sup>2</sup>;

Силикатное стекло  $\varepsilon_p < 0.1\%$ ,  $a \sim 1$  кДж/м<sup>2</sup>

Поликарбонат -  $\varepsilon_p = 50-110\%$ ,  $a = 120 - 140$  кДж/м<sup>2</sup>;

- 1) Воздействие внешней механической силы на полимеры приводит к их деформации. Различают деформации растяжения, сжатия, кручения и сдвига. Для изотропного материала, подчиняющегося закону Гука, модули упругости связаны друг с другом через коэффициент Пуассона.
- 2) При выбранной температуре основными механическими характеристиками твердого полимерного материала являются модуль Юнга ( $E$ ), разрывное удлинение ( $\epsilon_p$ ), разрушающее напряжение ( $\sigma_p$ ), тангенс угла механических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ) и ударная вязкость ( $a$ ). Зная эти параметры, можно количественно сравнивать жёсткость, прочность, пластичность, способность рассеивать механическую энергию и хрупкость различных полимерных материалов.