

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

(Лысенко Е.А.)

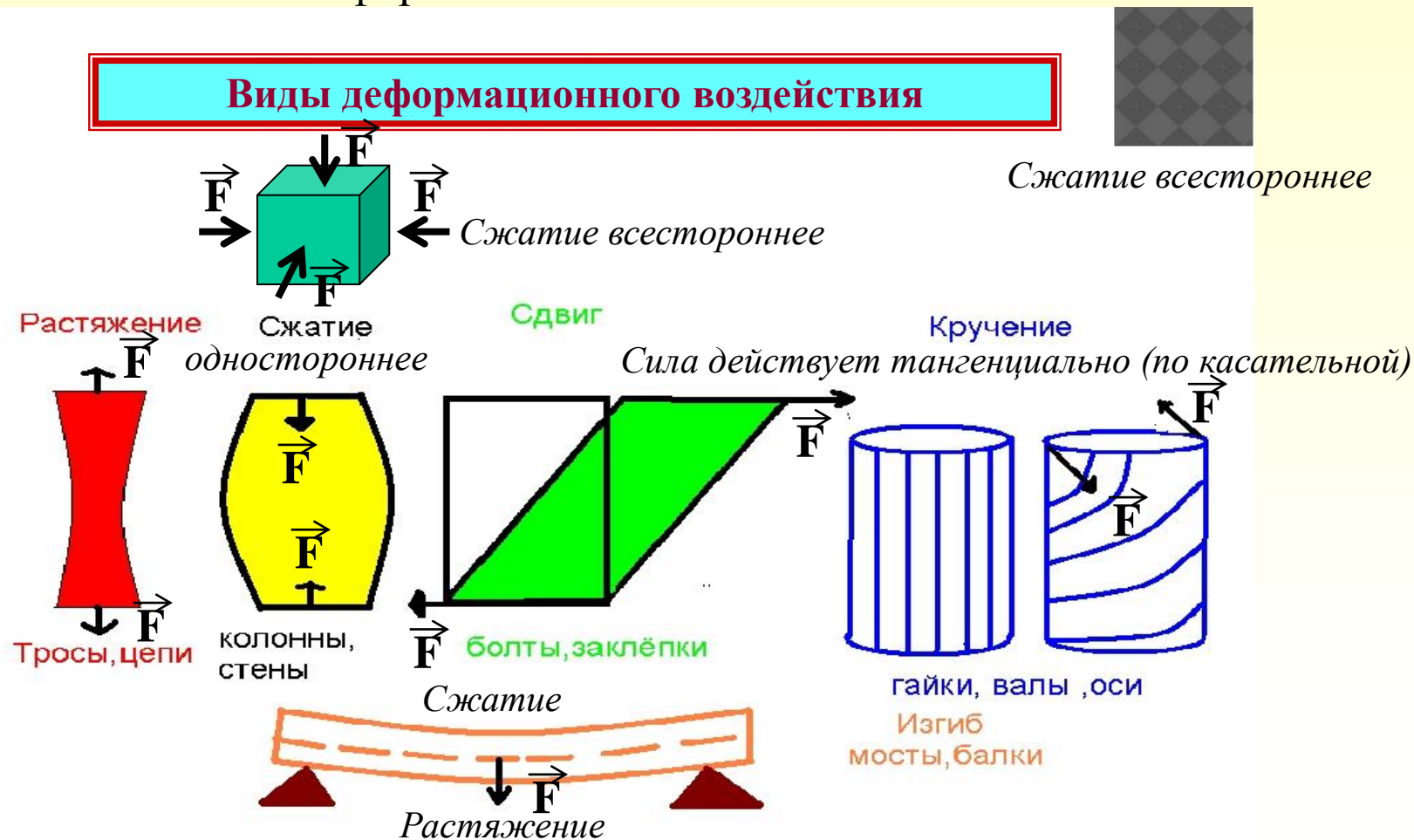
Лекция № 2.

Механические

***характеристики полимерных
материалов.***

2.1. Виды деформаций полимеров. Жесткость.

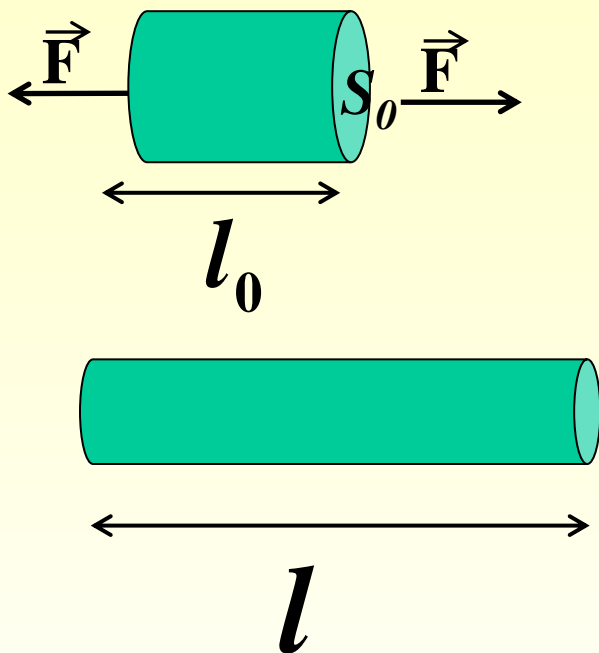
Деформация – (от лат. *deformatio* — «искажение») изменение взаимного положения частиц тела, связанное с их перемещением относительно друг друга под действием внешней механической силы. На макроуровне деформация проявляется в изменении формы и объёма тела.



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;

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

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

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

σ (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

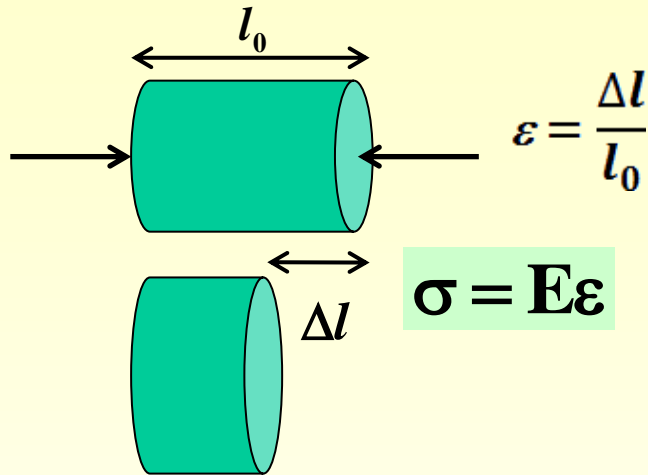
Характерны только для полимеров в стеклообразном ($T < T_g$) или кристаллическом ($T < T_{nl}$) состоянии. При нагревании выше T_g (или T_{nl}) полностью исчезают

Пластичные (холодное течение)

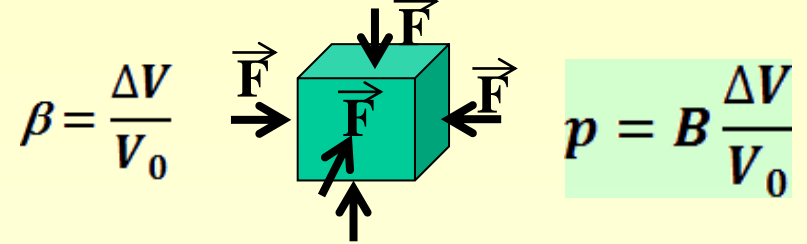
Связаны со с необратимым смещением центров тяжести молекул друг относительно друга без нарушения сплошности тела. При нагревании не исчезают

Как определяются другие виды деформации?

Деформация одностороннего сжатия



Деформация всестороннего сжатия



V_0 – начальный объем образца;

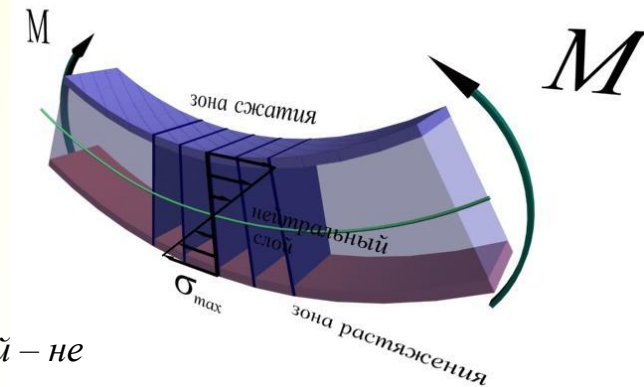
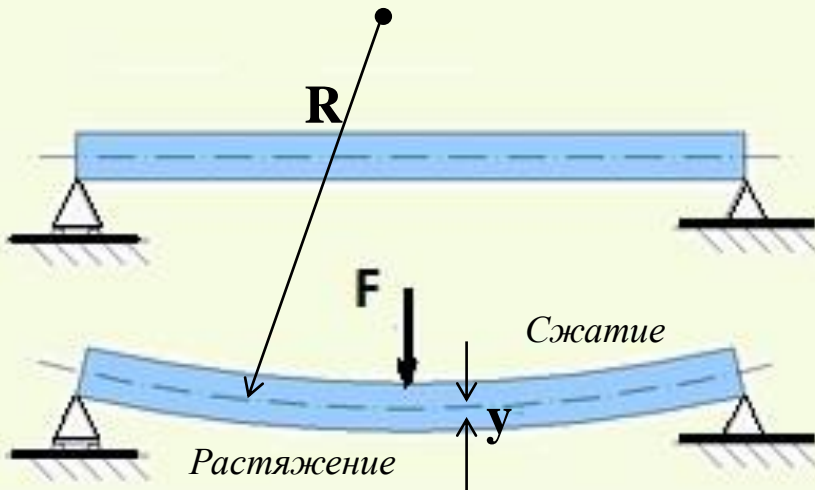
V – объем деформированного образца;

β – объемное сжатие;

p – давление в образце;

B – модуль объемной упругости;

Деформация изгиба

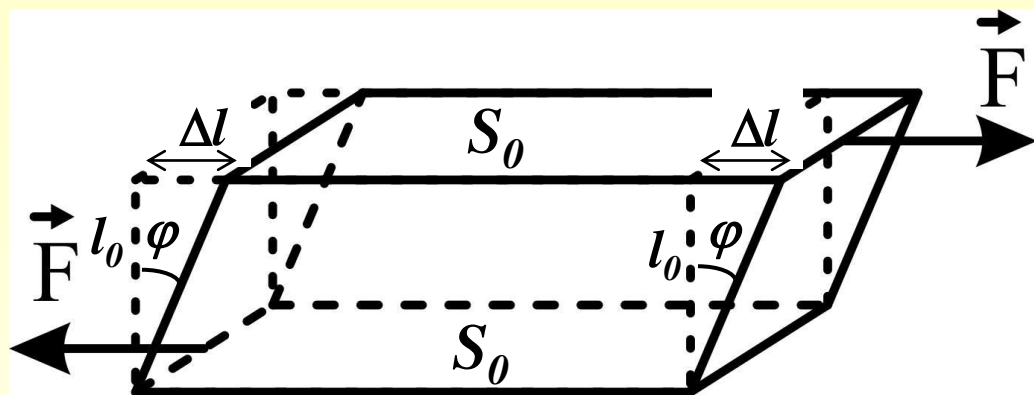


Нейтральный слой – не растягивается и не сжимается

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

Как определяются другие виды деформации?

Деформация сдвига (среза)

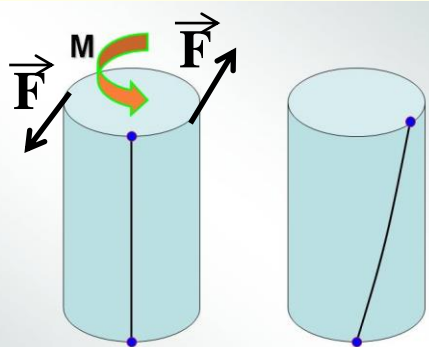


$$\tau = \frac{F}{S_0} \quad \gamma = \frac{\Delta l}{l_0} = \operatorname{tg} \varphi$$

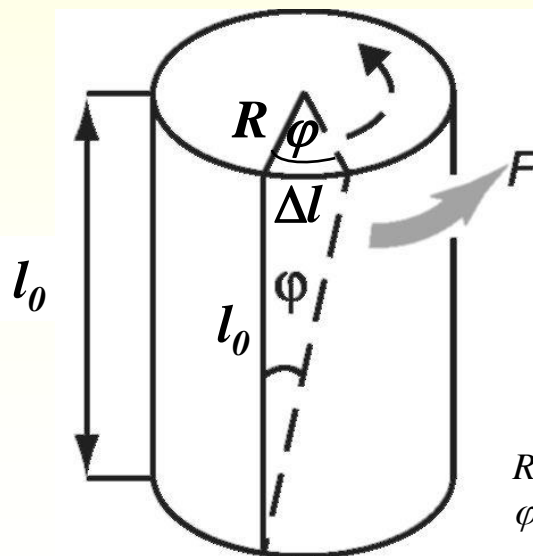
$$\tau = G \frac{\Delta l}{l_0} = G \gamma$$

τ – напряжение сдвига (направлено по касательной к поверхности);
 γ – 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;
 φ – 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;

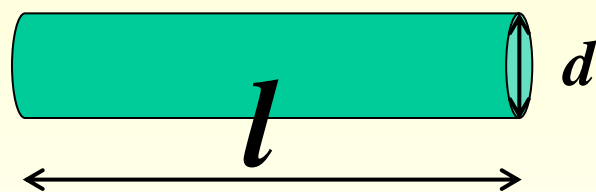
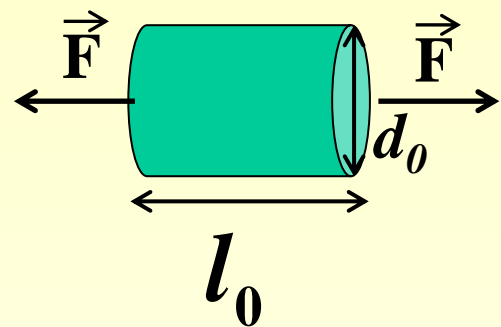
Стекло - $E \sim 10^{10}$ Па

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 (μ) - 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 (μ) полностью характеризуют упругие свойства изотропного материала

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

Электромеханическая разрывная машина

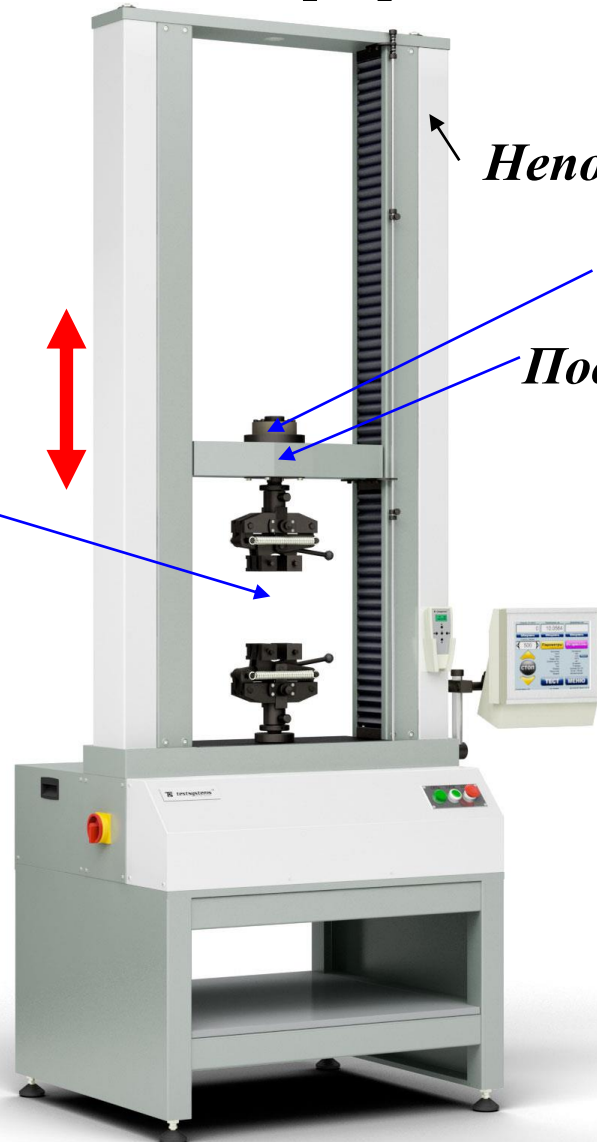
Зажимы с образцом



Неподвижная станина

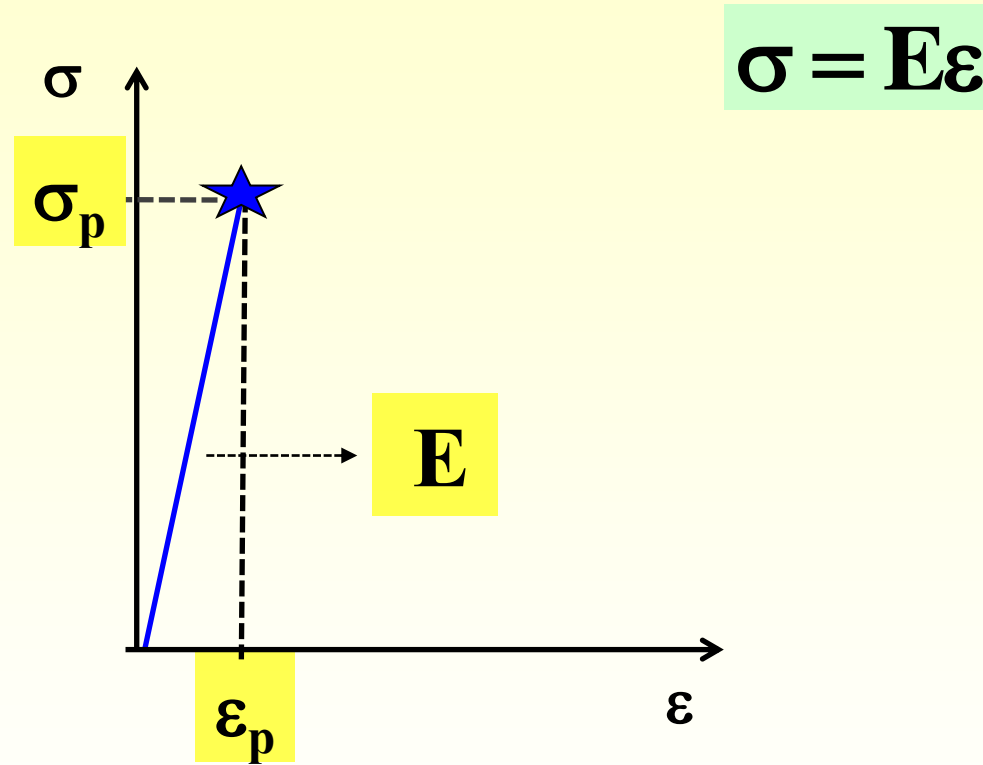
Динамометр

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?

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

ε_p - разрывная деформация - предельно возможная деформация тела без его разрушения.

E – модуль Юнга - тангенс угла наклона зависимости σ (ε).

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

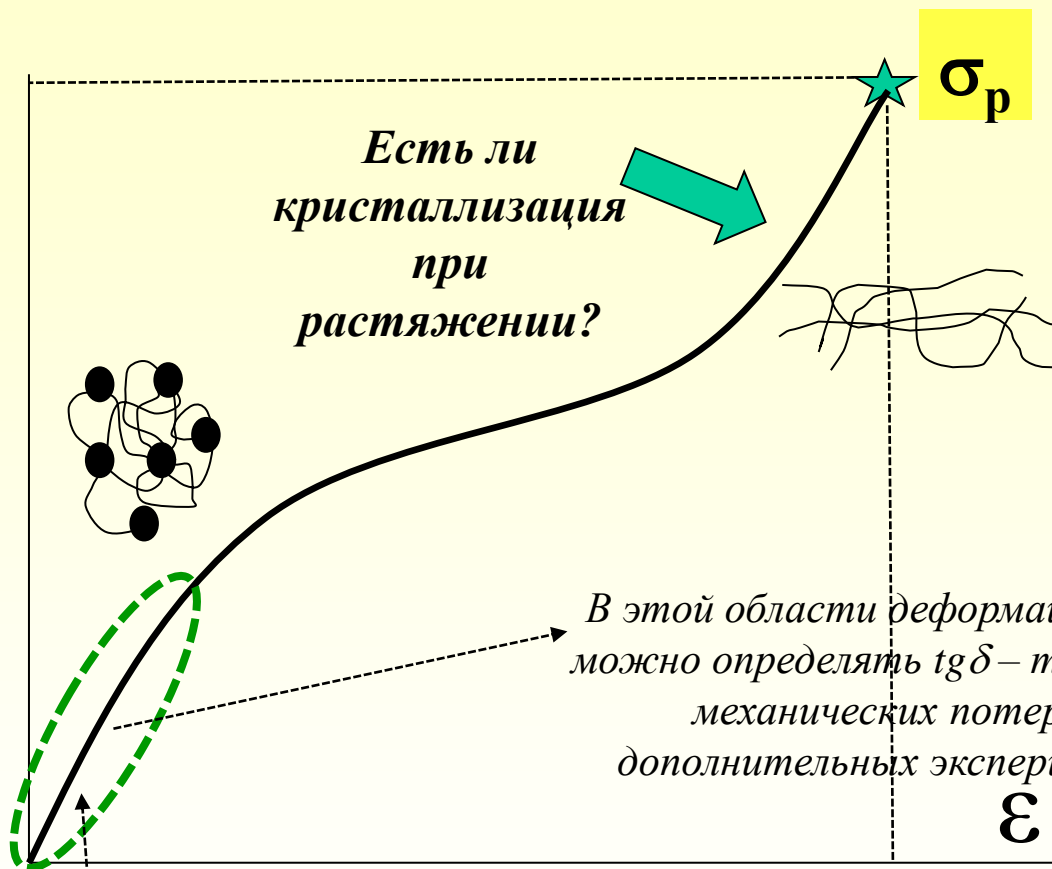
f - сила упругости; l_0 – первоначальная длина образца; S_0 – первоначальная площадь поперечного сечения образца; V_0 – объём образца, A – работа, затраченная на деформацию образца

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

Как выглядит кривая одноосного растяжения для полимера в высокоэластическом состоянии?

14

σ



σ_p – разрушающее (разрывное) напряжение;
 ϵ_p – деформация при разрыве.

E

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

ϵ_p

σ_p

ϵ

Что такое тангенс угла механических потерь и

15

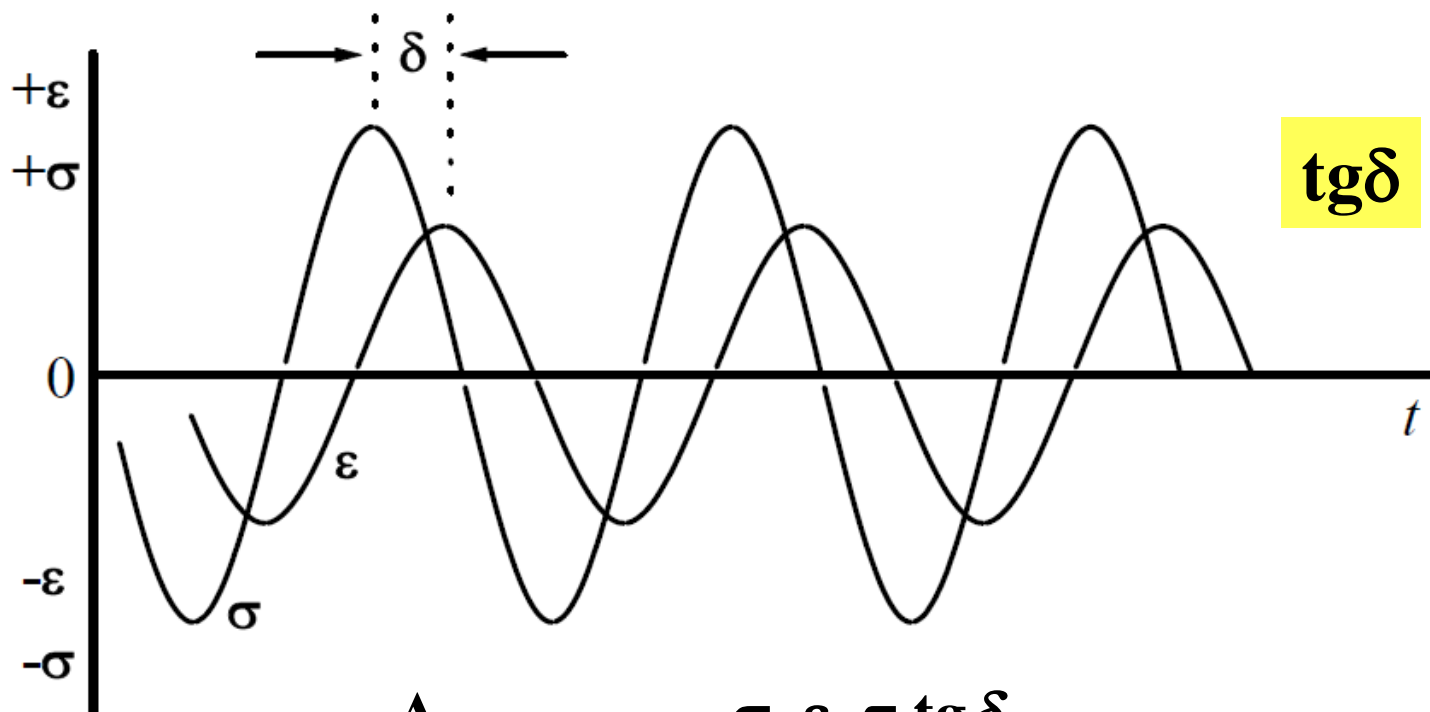
что он характеризует?

Вязкоупругое тело:

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

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

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

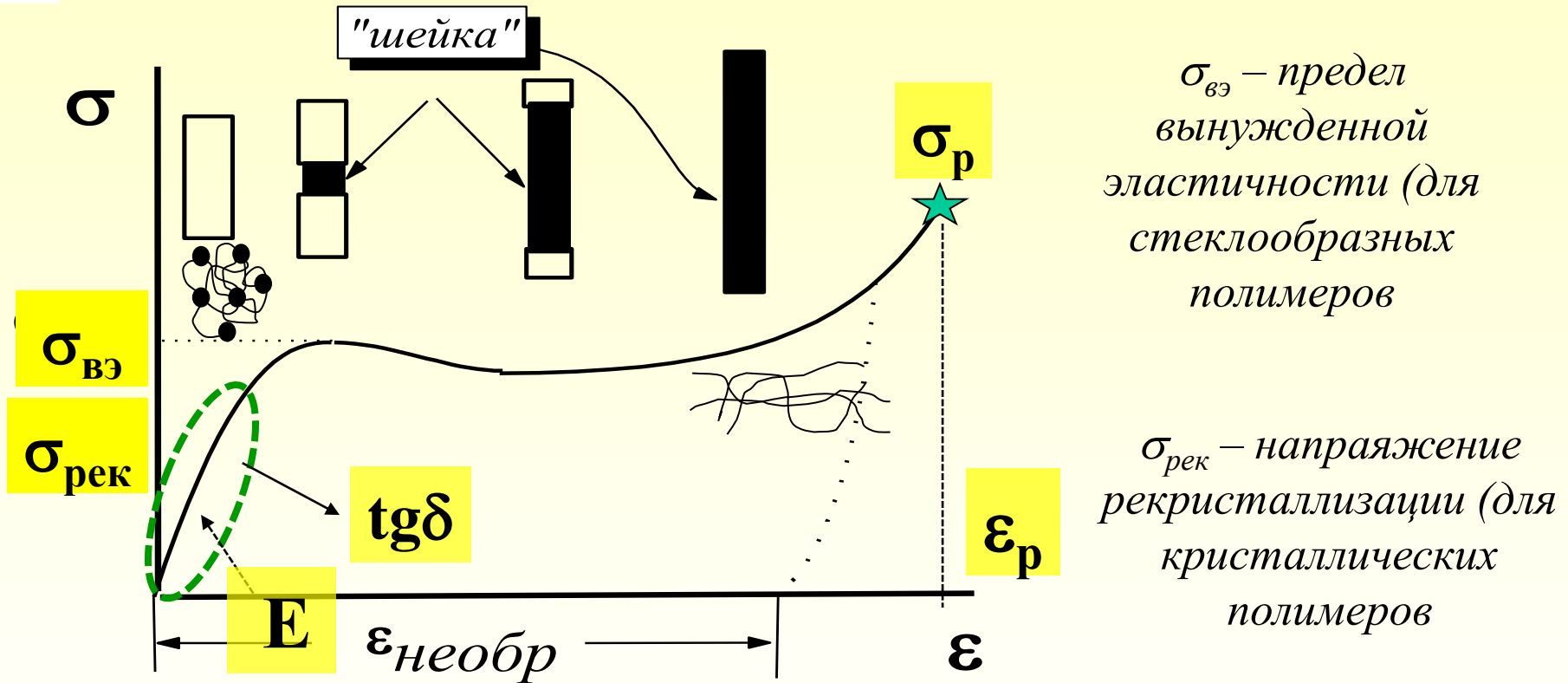


$$A_{\text{потерянная}} \sim \sigma_0 \varepsilon_0 \pi \text{tg}\delta$$

Тангенс угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (при выбранной частоте ω 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



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

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).

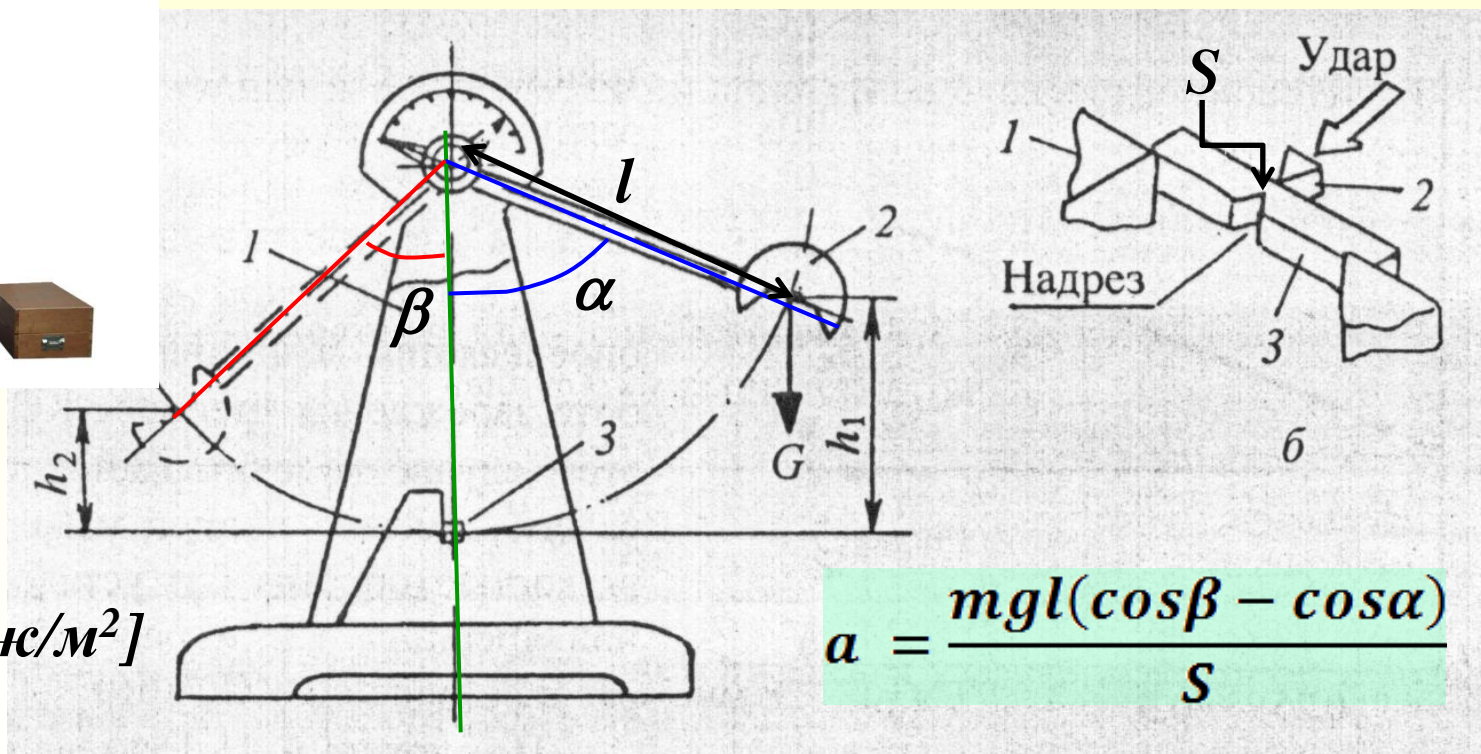
Как количественно оценить хрупкость материала

18

(сопротивляемость удару)?

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; α – угол заведения маятника; β – угол подъёма маятника после удара.

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

Полипропилен – $\epsilon_p = 400-800\%$, $a = 80$ кДж/м²;

$T = 20 - 25^\circ C$

Полистирол – $\epsilon_p = 1-3\%$, $a = 2-3$ кДж/м²;

Поливинилхлорид – $\epsilon_p = 10-50\%$, $a = 70-150$ кДж/м²;

Политетрафторэтилен - $\epsilon_p = 250-500\%$, $a = 100$ кДж/м²;

Полиэтилентерефталат - $\epsilon_p = 80-130\%$, $a = 90$ кДж/м²;

Полиамиды - $\epsilon_p = 100-250\%$, $a = 100-140$ кДж/м²;

Фенолформальдегидные смолы $\epsilon_p \sim 1\%$, $a = 2.5-5$ кДж/м²;

Полиметилметакрилат - $\epsilon_p = 2-3\%$, $a = 14-30$ кДж/м²;

Силикатное стекло $\epsilon_p < 0.1\%$, $a \sim 1$ кДж/м²

Поликарбонат - $\epsilon_p = 50-110\%$, $a = 120 - 140$ кДж/м²;

- 1) Воздействие внешней механической силы на полимеры приводит к их деформации. Различают деформации растяжения, сжатия, изгиба, кручения, сдвига и всестороннего сжатия. 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 (ϵ_p), разрушающее напряжение (σ_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.