



Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Фізичний факультет



Кафедра фізики кристаллов

Механические свойства кристаллов

Лекция

Механические свойства

Упругость - способность тел возобновлять размеры (форму или объем) после снятия нагрузок;

Пластичность- способность твердого тела необратимо изменять свои размеры и объем

- Сверхпластичность (100-1000%)
- Обычная пластичность (1-50%)

Прочность (разрушение) – способность сохранять свою целостность

Виды разрушений

- Хрупкое разрушение происходит без макроскопической деформации или с очень малой деформацией.
- Вязкое разрушение сопровождается значительной пластической деформацией и является результатом медленного разрастания достаточно длинных трещин
- Усталостное разрушение возникает при циклическом нагружении, приводящем к необратимому накоплению повреждений , являющихся очагами будущего разрушения

Величины, которые нужно задавать и измерять, при исследовании МС

Сила

Деформация

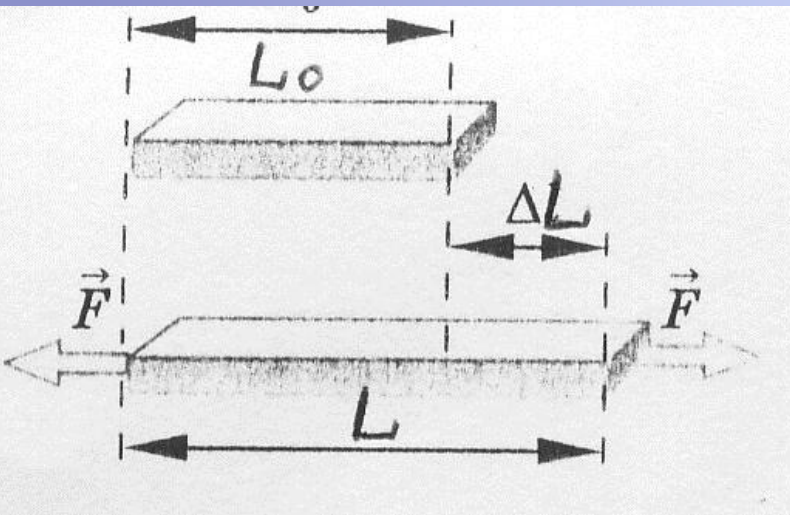
Время

Температура

Напряжение

Относительная деформация

Скорость пластической деформации



Механическим напряжением называют отношение модуля силы упругости F к площади поперечного сечения S тела, характеризует состояние деформированного тела

$$\sigma = F/S$$

$$[\sigma] = 1\text{Н/м}^2 = \text{Па}$$

Физическая величина,
равная модулю разности конечной и начальной длины деформированного тела, называется **абсолютной** деформацией:

$$\Delta L = L - L_0$$

Физическая величина,
равная отношению абсолютной деформации тела к его начальной длине, называют **относительной** деформацией:

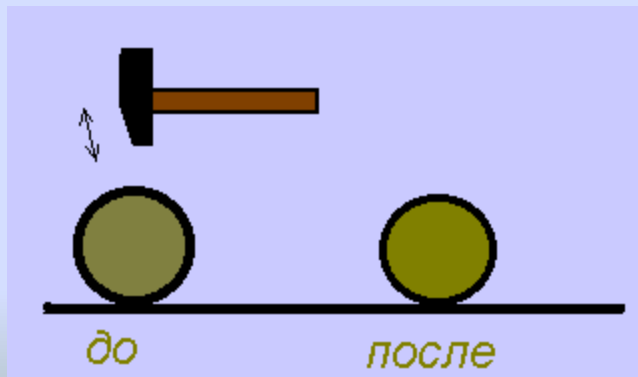
$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

$$\varepsilon = (\Delta L / L_0) * 100 \%$$

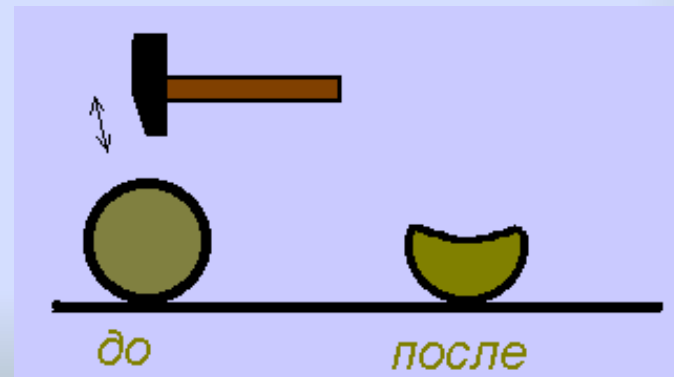
Деформация твердых тел

Деформация – изменение формы или объема тела под действием внешних сил:

упругая



пластическая



Основные режимы нагружения твердых тел

1. Активное нагружение

2. Ползучесть

3. Релаксация напряжений

4. Знакопеременные напряжения

- Усталостные испытания
- Внутреннее трение

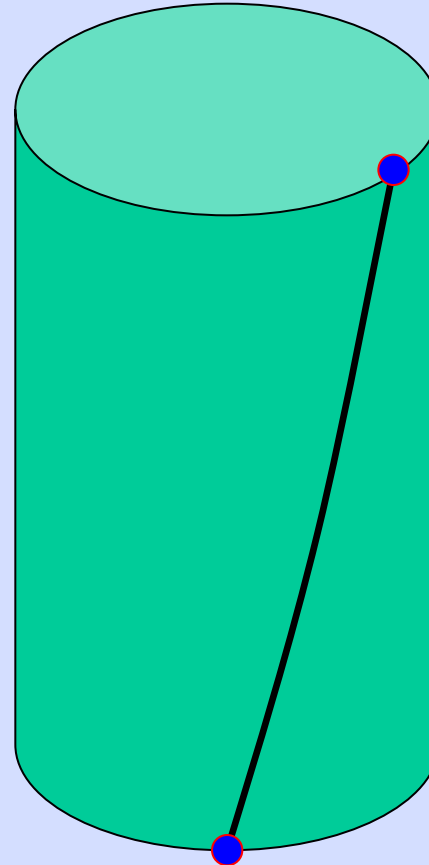
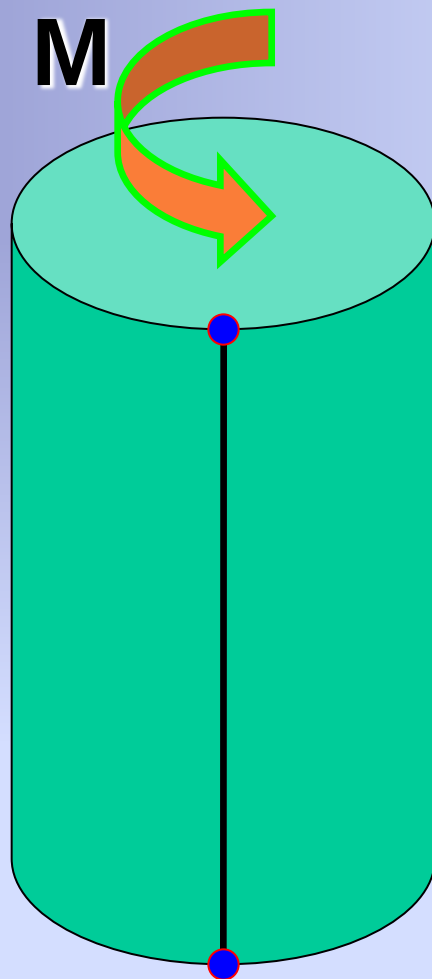
Связь между дислокациями и пластической деформацией

- Перемещение дислокации на одну трансляцию решетки – элементарный акт пластической деформации
- Напряжение необходимое для скольжение дислокации – критическое напряжение для начала пластического течения материала
- Любой фактор препятствующий движению дислокаций в материале увеличивает предел текучести

*Активное нагружение –
постоянная скорость деформации*

Виды деформации

- ✓ Сжатия (Растяжения)
- ✓ Кручения
- ✓ Сдвига
- ✓ Изгиба

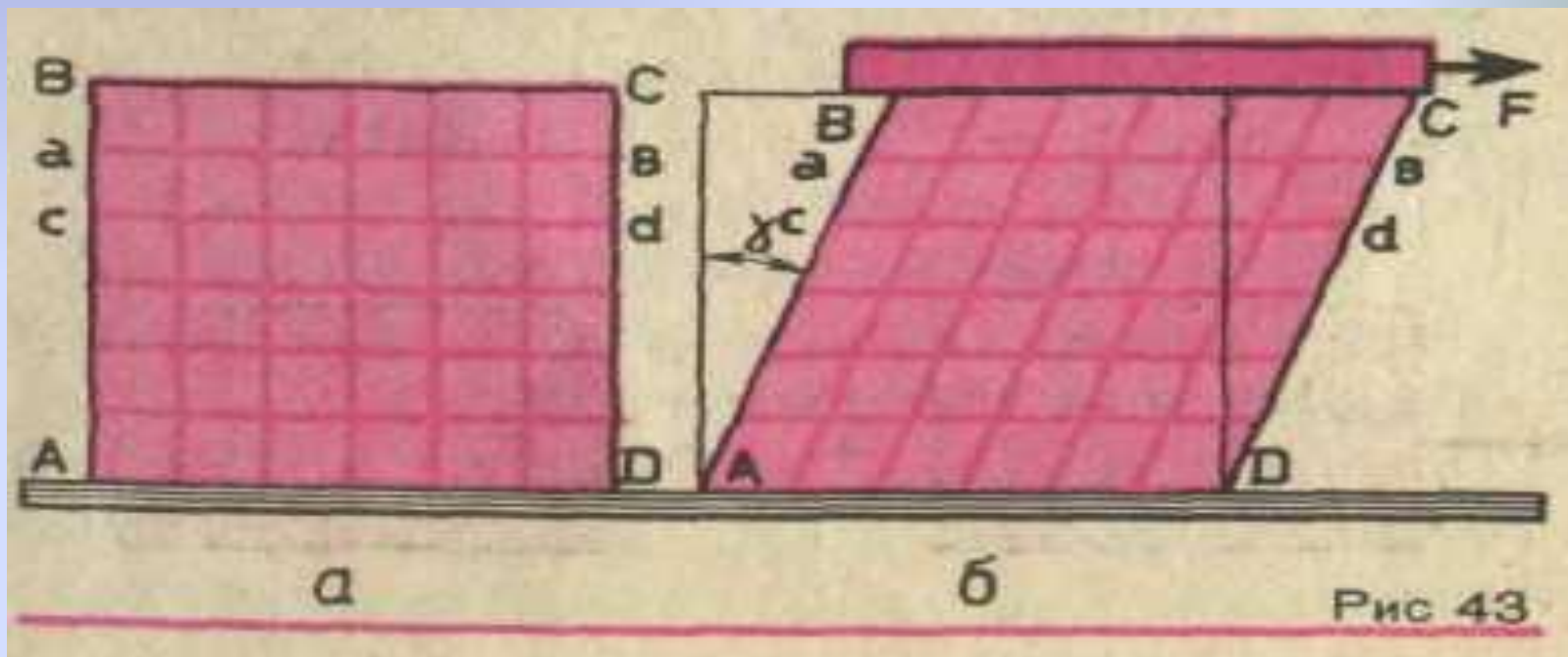


**При чистом кручении форма не меняется, но
перемещение есть**

Кручение

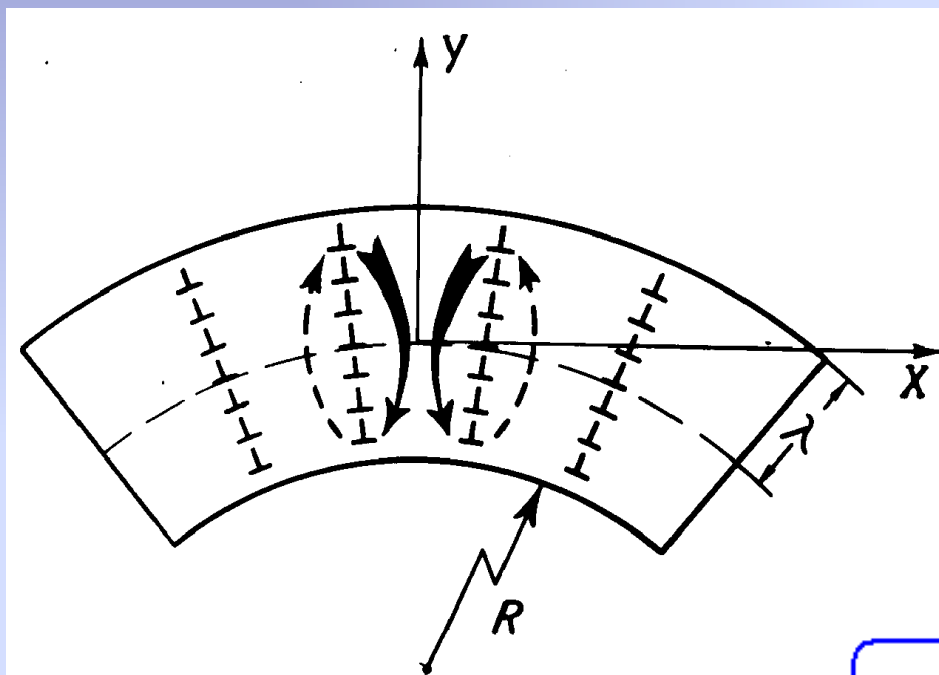
➤ При деформациях тел часто возникают вязкоупругие свойства, которые заключаются в том, что напряжение зависит не только от деформации(ϵ), но и от скорости ее изменения со временем.

Деформация сдвига



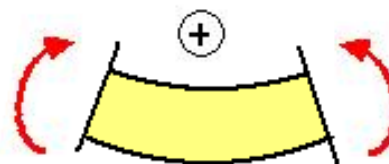
$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{d}{L}$$

Деформация изгиба



$$\varepsilon \approx \frac{\Delta\lambda}{2R}$$

Знаки (правила)

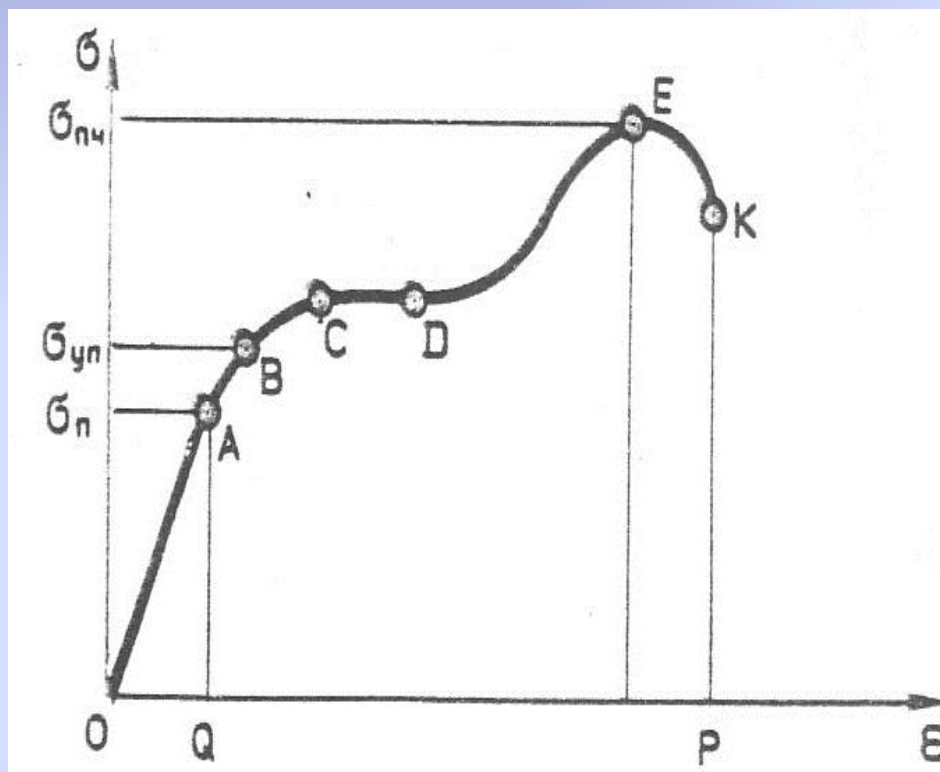


Кривизна
положительная



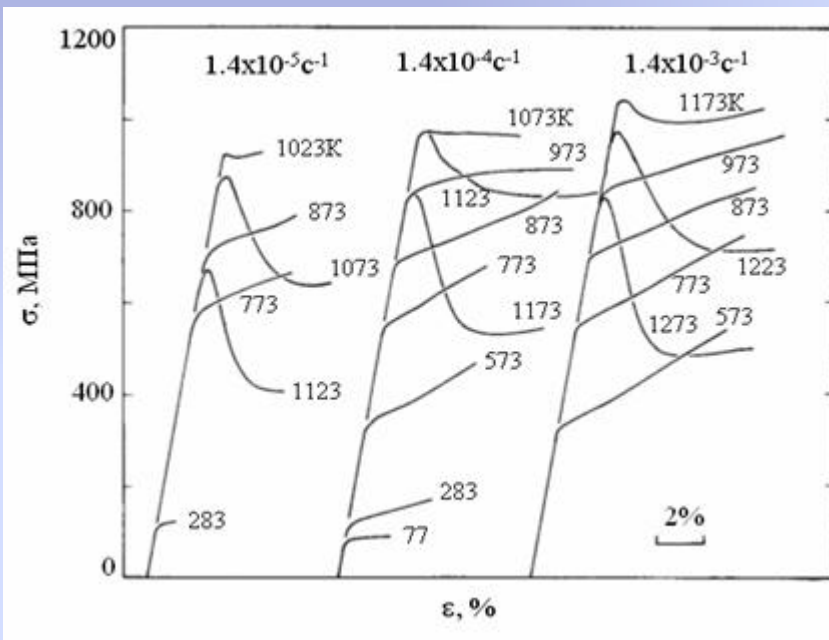
Кривизна
отрицательная

Кривая деформационного упрочнения

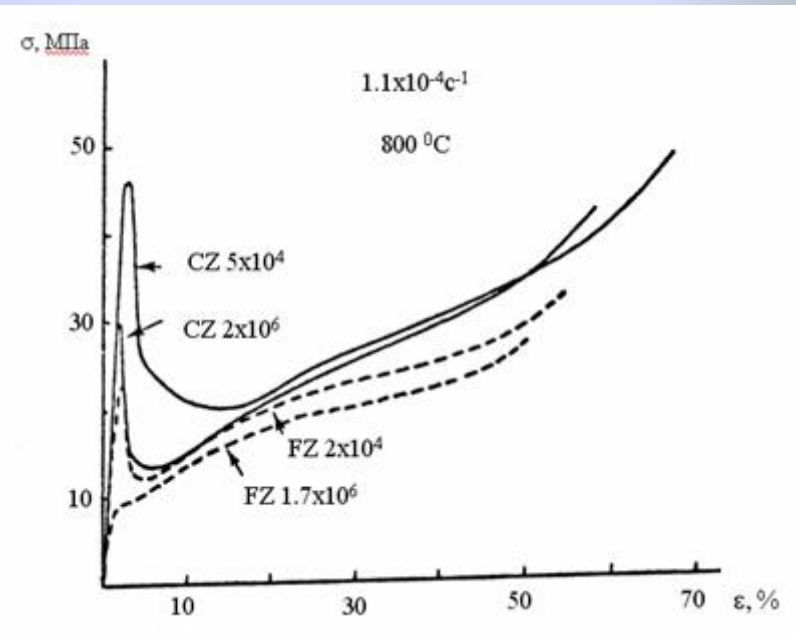


- OAB – область упругих деформаций
- B – предел упругости
- BC – область пластических деформаций
- C – предел пластичности
- CD – область текучести
- DE – с увеличением нагрузки удлинение быстро начинает возрастать
- E – предел прочности
- EK – разрушение образца

Деформационные кривые реальных монокристаллов

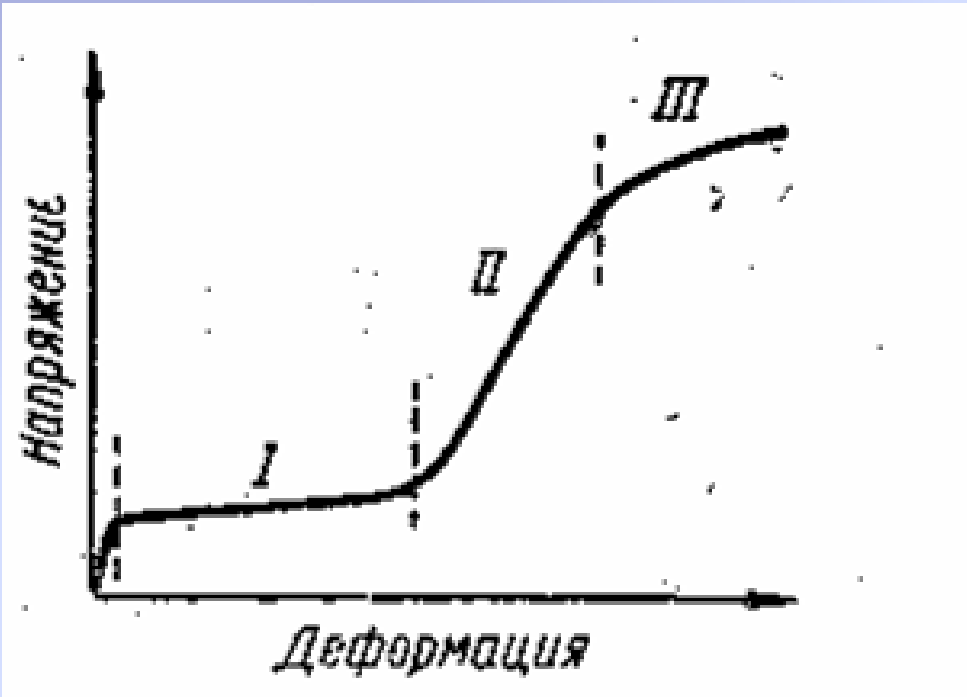


Ni_3Al (легированный)



Кремний

Характерные участки



- «0» - упругая деформация
- «I» - стадия легкого скольжения
- «II» - стадия упрочнения
- «III» - стадия разупрочнения

монокристаллы

Закон Гука (кристалл изотропный)

При малых деформациях механическое напряжение прямо пропорционально относительной деформации.

$$\sigma = E * \varepsilon \text{ (растяжение, сжатие)}$$

$$\sigma = G * \varepsilon \text{ (сдвиг)}$$

- Коэффициент пропорциональности

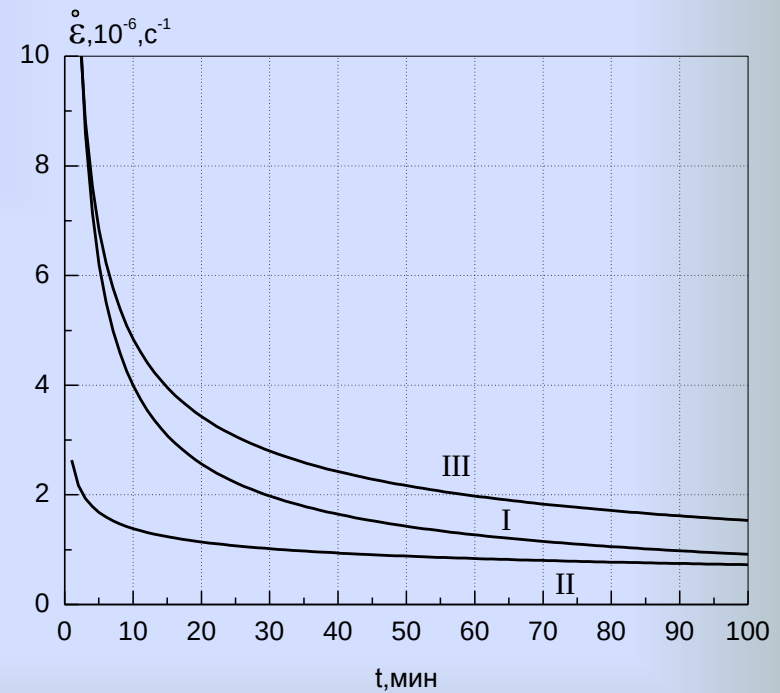
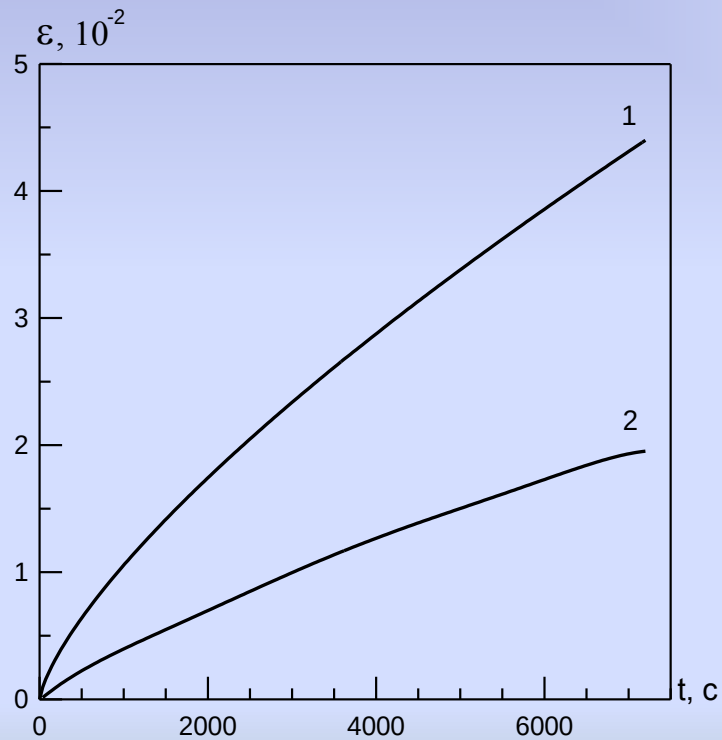
E , входящий в закон Гука, называется модулем упругости или модулем Юнга.

$$E = [\text{Па}]$$

G , модулем сдвига.

$$G = [\text{Па}]$$

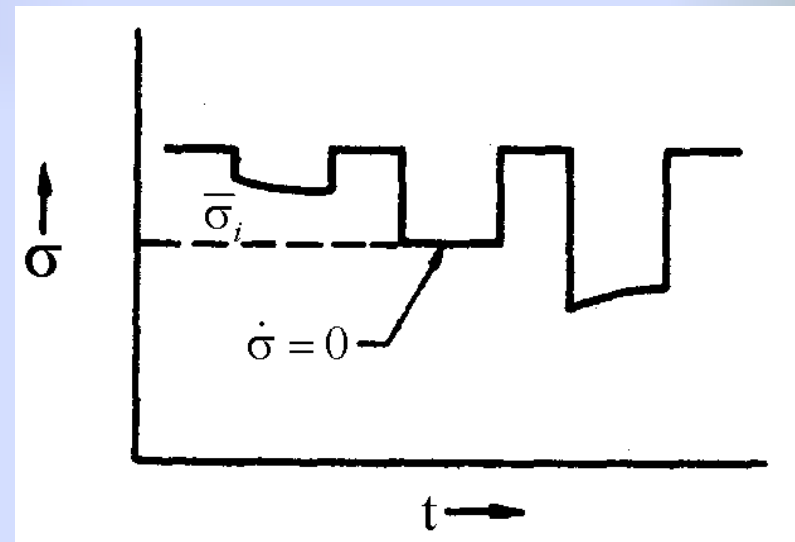
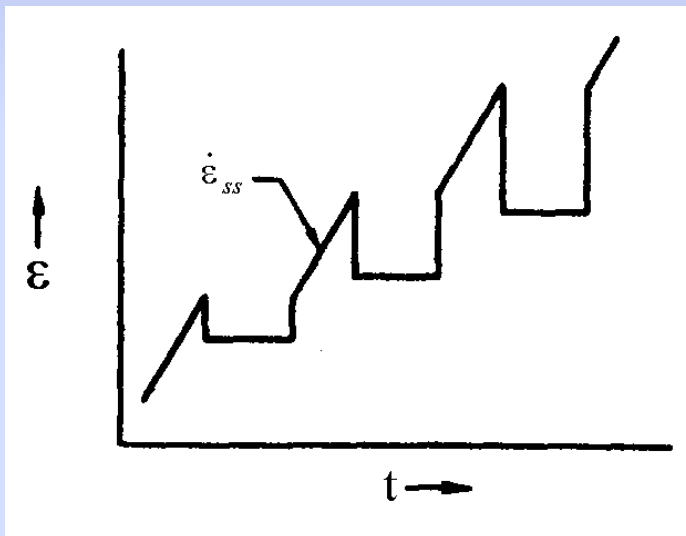
Ползучесть – деформация при постоянном уровне внешних напряжений



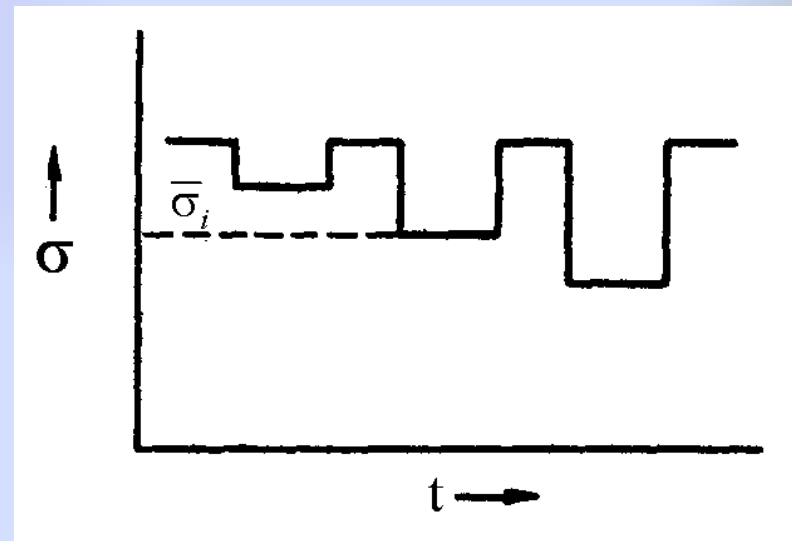
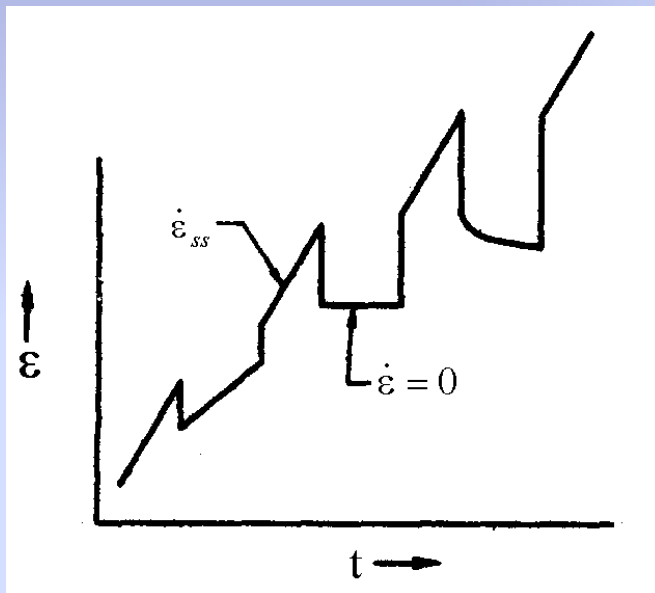
Релаксация напряжений

– явление уменьшения со временем величины напряжения в образце при поддержании постоянной величины деформации.

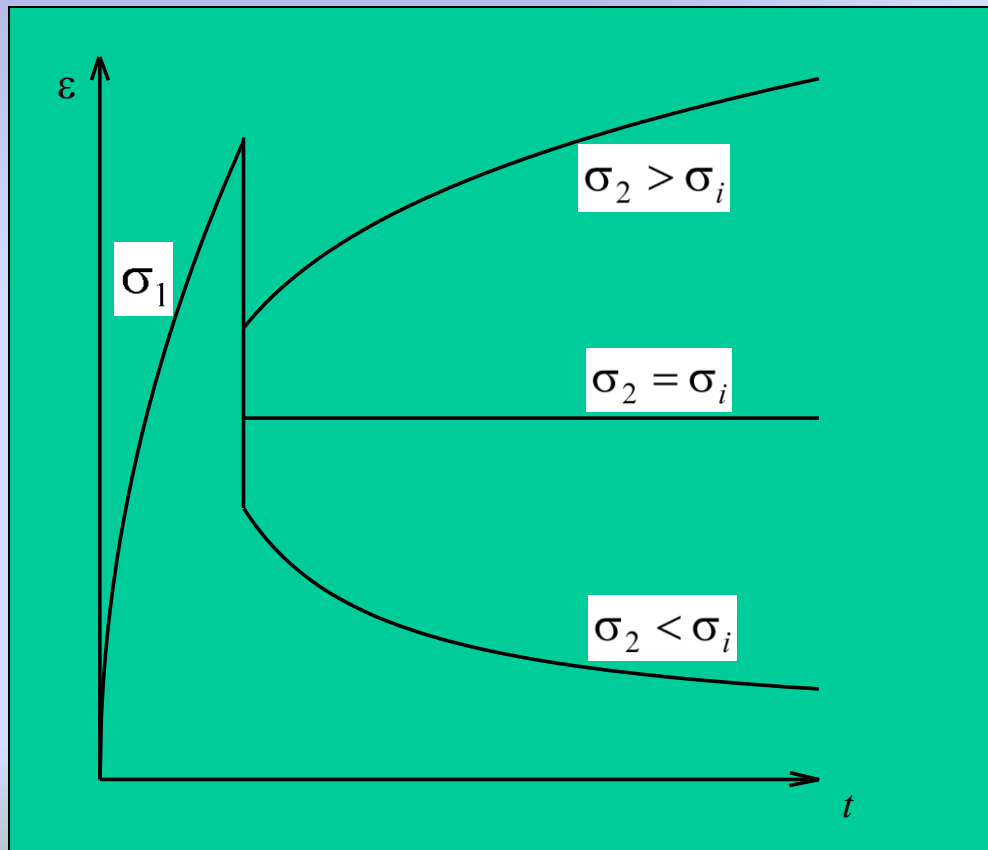
Определение средних внутренних напряжений по методике stress transient dip test



Определение средних внутренних напряжений по методике strain transient dip test



Методика определения внутренних напряжений



$$\sigma_{eff} = \sigma - \sigma_i$$

Законопеременные напряжения

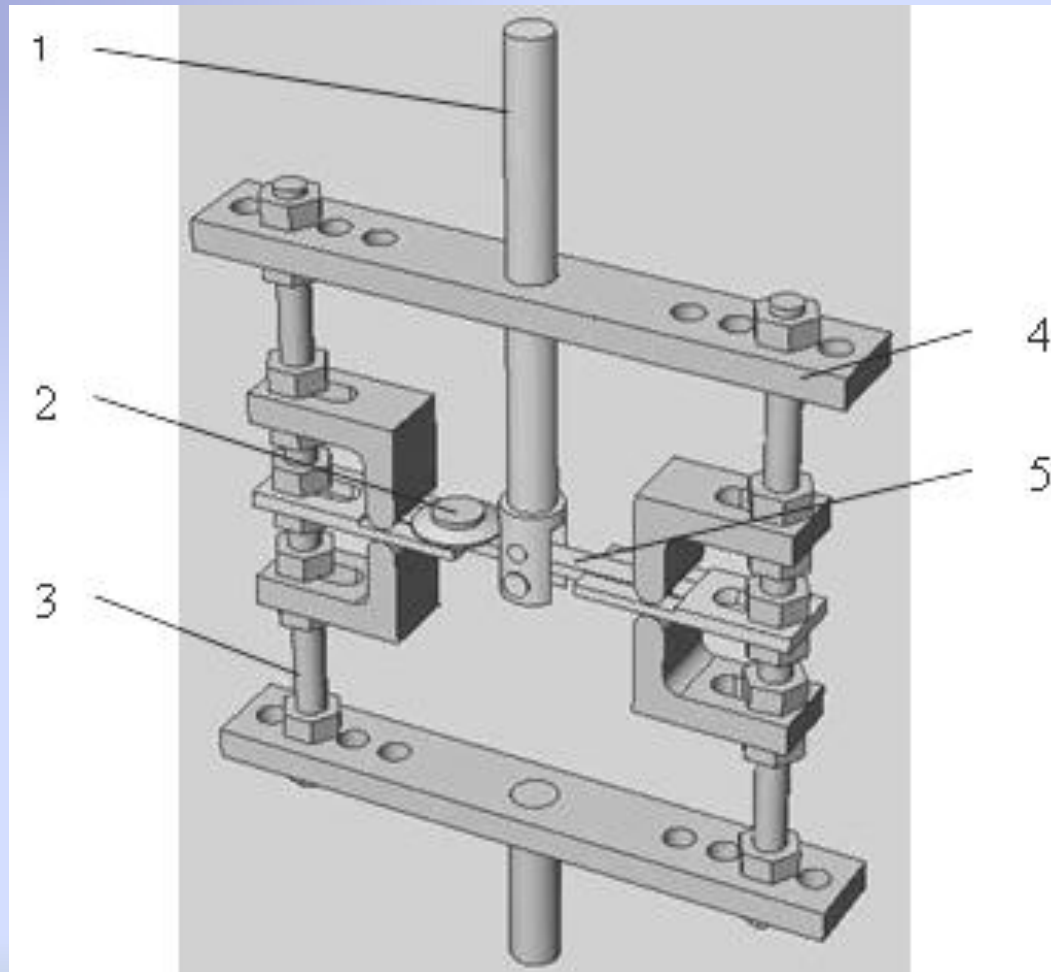
1. Испытания на усталость
2. Внутреннее трение

Усталость - разрушение, возникающее под действием циклически изменяющихся напряжений.

Усталостью определяется степень долговечности почти всей техники.

Внутреннее трение, совокупность различных процессов внутри твёрдого тела (а также в жидкостях и газах), приводящих к необратимому рассеянию механической энергии при деформации, связанному с преобразованием механической энергии в тепловую

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО СХЕМЕ ТРЕХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА С ПРИЛОЖЕНИЕМ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ



1 - шток; 2 – источник вынужденных колебаний; 3 – опоры;
4 – корпус устройства; 5 – испытываемый образец.

Механические свойства

(применение)



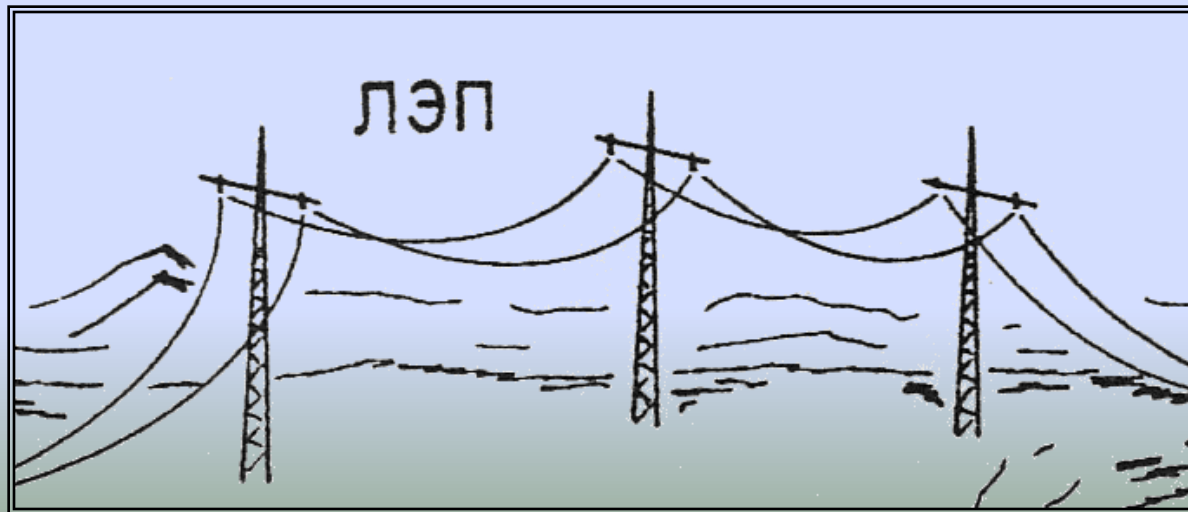
- Расчет механического напряжения в разных телах при деформациях, при строительстве зданий (рельсов, балок и т. д.).
- Возможность менять формы тел.
- Обнаружение дефектов веществ.

Тепловые свойства (применение)

- ✓ Учетывание размеров предметов при их нагревании и охлаждении:

при натяжении ЛЭП;

трубы водяного отопления...



Описание пластической деформации

Макроскопическое (феноменологическое) описание – не рассматривает механизмы ПД, а позволяет связать между собой основные параметры.

Полуструктурные теории – вводятся основные носители ПД (дислокации). В результате имеем связь между макроскопическими параметрами и величинами, характеризующими дислокационную структуру.

Структурные теории – в различных условиях механических испытаний рассматривают возможные механизмы деформации.

Феноменологическое описание ПД

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t, T)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \left. \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right|_{\dot{\varepsilon}, t, T} \cdot \varepsilon + \left. \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} \right|_{\varepsilon, t, T} \cdot \dot{\varepsilon} + \left. \frac{\partial \sigma}{\partial t} \right|_{\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T} \cdot t + \left. \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right|_{\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t} \cdot T$$

$$T = \text{const}$$

$$H = \left. \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right|_{\dot{\varepsilon}, t}$$

Коэффициент упрочнения

$$H = [\text{Па}]$$

$$\eta = \left. \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} \right|_{\varepsilon, t}$$

Коэффициент вязкости

$$\eta = [\text{Па} \cdot \text{с}]$$

$$R = - \left. \frac{\partial \sigma}{\partial t} \right|_{\varepsilon, \dot{\varepsilon}}$$

Коэффициент разупрочнения

$$R = \left[\frac{\text{Па}}{\text{с}} \right]$$

$$\sigma = \sigma_0 + H\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} - Rt$$

$$H, \eta, R = \text{const}$$

$$d\sigma = Hd\varepsilon + \eta d\dot{\varepsilon} - Rdt$$

1. Активная деформация $\dot{\varepsilon} = \text{const}, d\dot{\varepsilon} = 0$

$$d\sigma = Hd\varepsilon - Rdt$$

0» - Закон Гука $\sigma = G\varepsilon, \quad H_0 = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = G$

«I» - стадия легкого скольжения

$$H_I = 10^{-5} - 10^{-6} G$$

«II» - стадия упрочнения

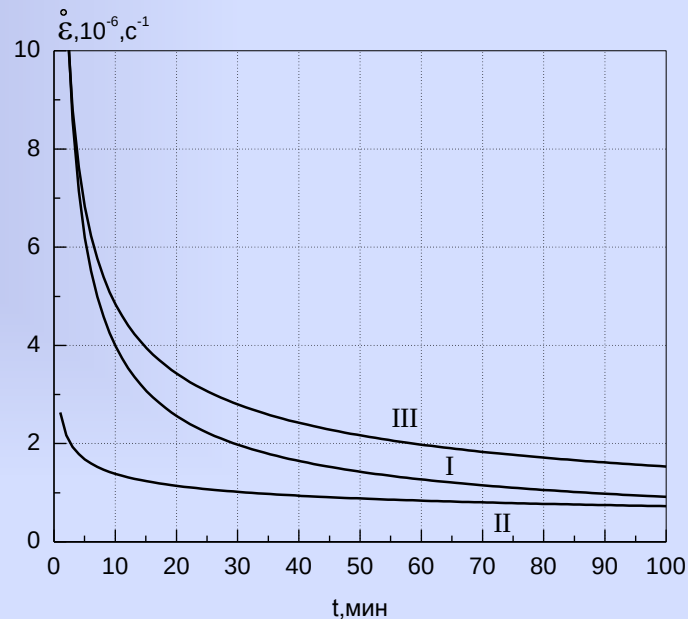
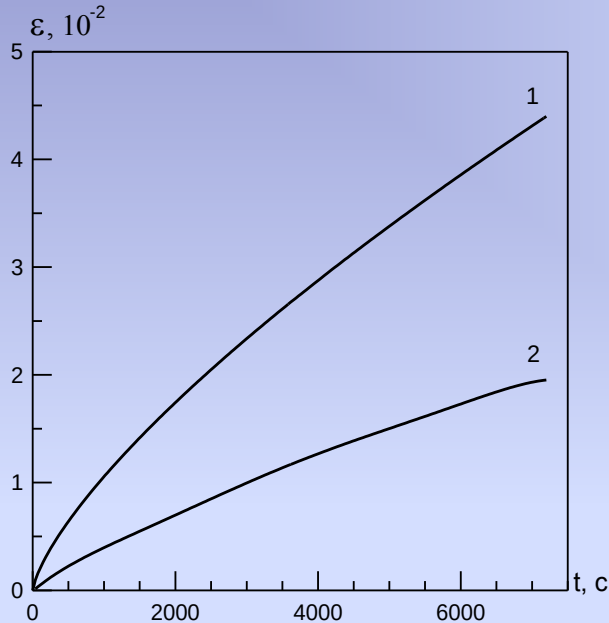
$$H_{II} = 10^{-4} - 10^{-2} G$$



2. Ползучесть

$$\sigma = \text{const}, d\sigma = 0$$

- Начальная деформация
- Стационарная стадия
- Общий случай



- Начальная деформация

$$t \rightarrow 0, \varepsilon \rightarrow 0 \Rightarrow$$

$$\sigma = \sigma_0 + H\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} - Rt$$

$$\sigma = \sigma_0 + \eta\dot{\varepsilon}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma - \sigma_0}{\eta} = \chi(\sigma - \sigma_0)$$

бингановские тела

$$\sigma_0 = 0$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta} = \chi\sigma$$

«НЬЮТОНОВСКИЕ» тела

- Стационарная стадия ползучести

$$\sigma = const, d\sigma = 0$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{st} = const, d\dot{\varepsilon} = 0$$

$$d\sigma = Hd\varepsilon + \eta d\dot{\varepsilon} - Rdt$$

$$0 = Hd\varepsilon - Rdt$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{R}{H} = \dot{\varepsilon}_{st}$$

При низких гомологических температурах $R \rightarrow 0$ и стационарная стадия не наступает.

•Общий случай ползучести

$\dot{\varepsilon}(t) - ?$

$$d\sigma = Hd\varepsilon + \eta d\dot{\varepsilon} - Rdt$$

$$0 = Hd\varepsilon + \eta d\dot{\varepsilon} - Rdt$$

$$H, \eta, R = \text{const}$$

$$\eta d\dot{\varepsilon} = Rdt - Hd\varepsilon = dt \left(R - H \frac{d\varepsilon}{dt} \right) = dt(R - H\dot{\varepsilon})$$

$$\frac{d\dot{\varepsilon}}{R - H\dot{\varepsilon}} = \frac{dt}{\eta}$$

$$\int \frac{d\dot{\varepsilon}}{R - H\dot{\varepsilon}} = \int \frac{dt}{\eta} \Rightarrow \frac{\ln(R - H\dot{\varepsilon})}{-H} = \frac{1}{\eta}t + \text{const} \quad \Big|_{t=0}^{\dot{\varepsilon}=\dot{\varepsilon}_{st}}$$

$$\ln(R - H\dot{\varepsilon}) = -\frac{H}{\eta}t + \ln(R - H\dot{\varepsilon}_0)$$

$$\frac{R - H\dot{\varepsilon}}{R - H\dot{\varepsilon}_0} = e^{-\frac{H}{\eta}t}$$

$$R - H\dot{\varepsilon} = (R - H\dot{\varepsilon}_0) \cdot e^{-\frac{H}{\eta}t} \quad (\div H)$$

$$\frac{R}{H} = \dot{\varepsilon}_{st}$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{st} + (\dot{\varepsilon}_0 - \dot{\varepsilon}_{st}) \cdot e^{-\frac{H}{\eta}t}$$

$$\dot{\varepsilon}_0 > \dot{\varepsilon}_{st}$$

При $t \rightarrow 0, \dot{\varepsilon} \rightarrow \dot{\varepsilon}_0$

При $t \rightarrow \infty, \dot{\varepsilon} \rightarrow \dot{\varepsilon}_{st}$

$$\int \dot{\varepsilon} = \int \dot{\varepsilon}_{st} + (\dot{\varepsilon}_0 - \dot{\varepsilon}_{st}) \cdot e^{-\frac{H}{\eta}t} + const$$

$$t = 0, \dot{\varepsilon} = 0 \quad \text{-начальные условия}$$

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon}_{st} \cdot t - \frac{\eta}{H} (\dot{\varepsilon}_0 - \dot{\varepsilon}_{st}) \cdot e^{-\frac{H}{\eta}t} + const$$

$$const = \frac{\eta}{H} (\dot{\varepsilon}_0 - \dot{\varepsilon}_{st})$$

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon}_{st} \cdot t + \frac{\eta}{H} (\dot{\varepsilon}_0 - \dot{\varepsilon}_{st}) \cdot \left[1 - e^{-\frac{H}{\eta}t} \right]$$

$$\text{При } t \rightarrow \infty, \quad \varepsilon_{\max} = \frac{\eta}{H} (\dot{\varepsilon}_0 - \dot{\varepsilon}_{st})$$

Вывод

Феноменологическое описание ПД позволяет выявить основные закономерности кинетики деформации.

Есть ли вопросы?



