

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА**  
**кафедра «Динамика, прочность и износостойкость транспортных средств»**

## **МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ**

*Лектор: к.т.н., доцент Комиссаров Виктор Владимирович*  
*п.з.: ассистент Таранова Елена Сергеевна*

*Форма контроля знаний – экзамен*

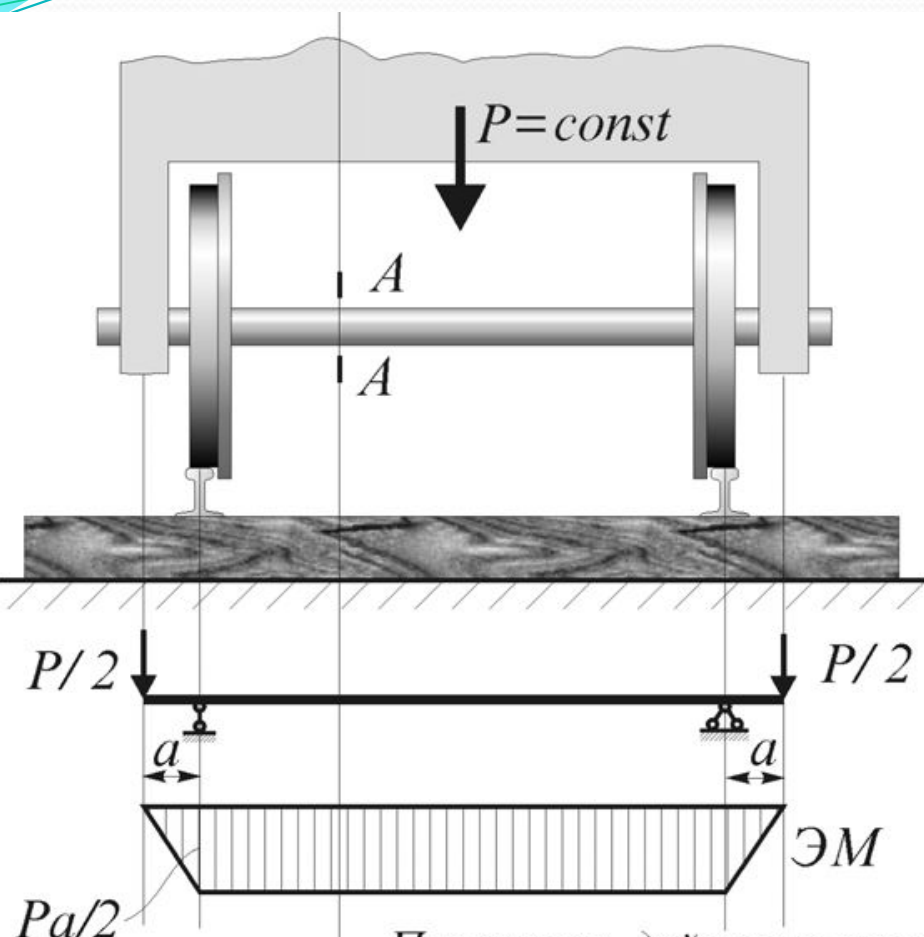
*(по всем вопросам обращаться на кафедру ауд. 1403, 1415а)*

**ГОМЕЛЬ, 2015**

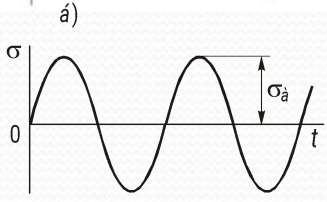
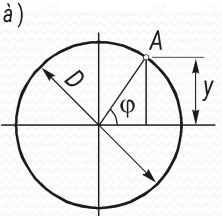
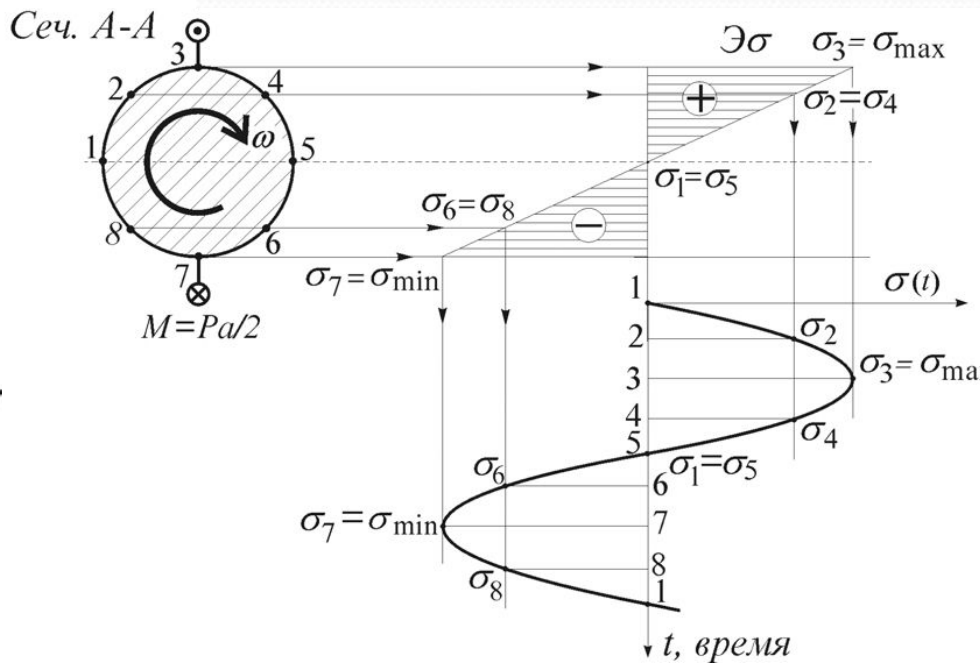


**Лекция 29**  
**ПРОЧНОСТЬ ПРИ**  
**ЦИКЛИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ**

# 29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЯВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ



Плоскость действия постоянного изгибающего момента  $M = Pa/2$

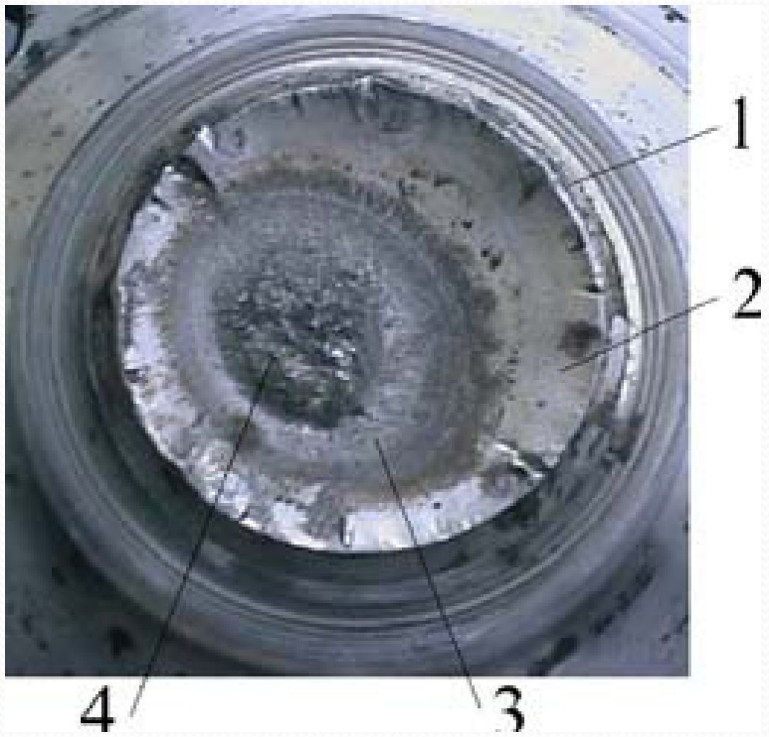


$$y = \frac{D}{2} \sin(\omega t);$$

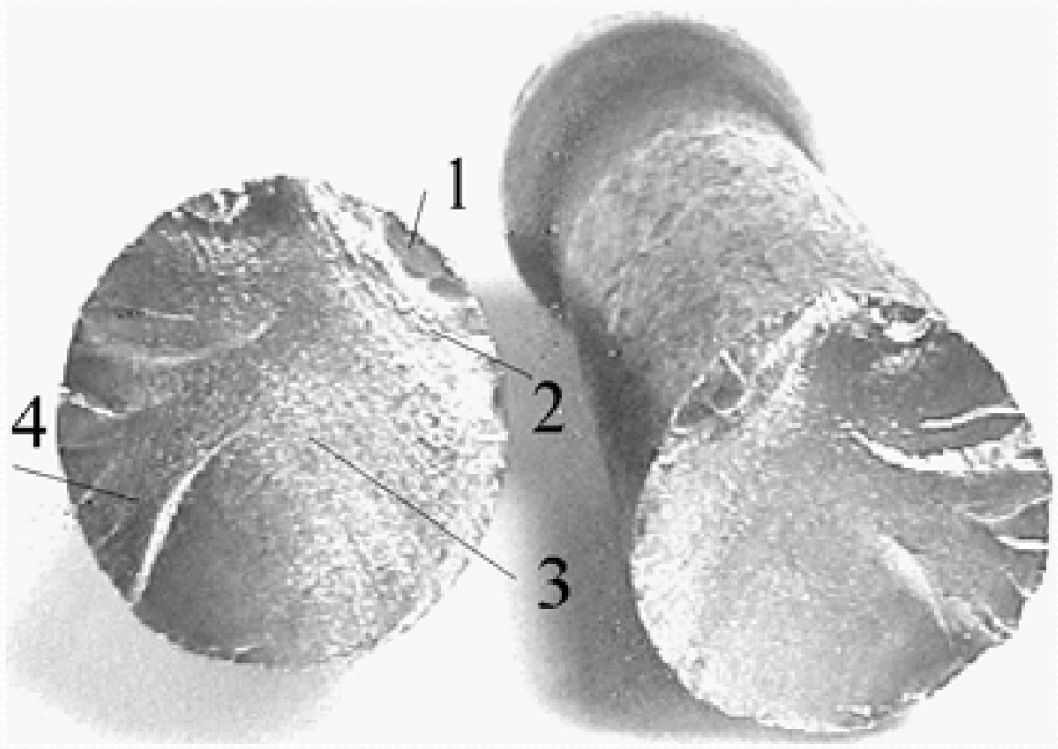
$$\sigma(t) = \frac{FaD}{2J_x} \sin(\omega t)$$



# 29.3 УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. ЯВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ



Вал ведущего колеса  
автомобиля



Долото перфоратора



# 29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.

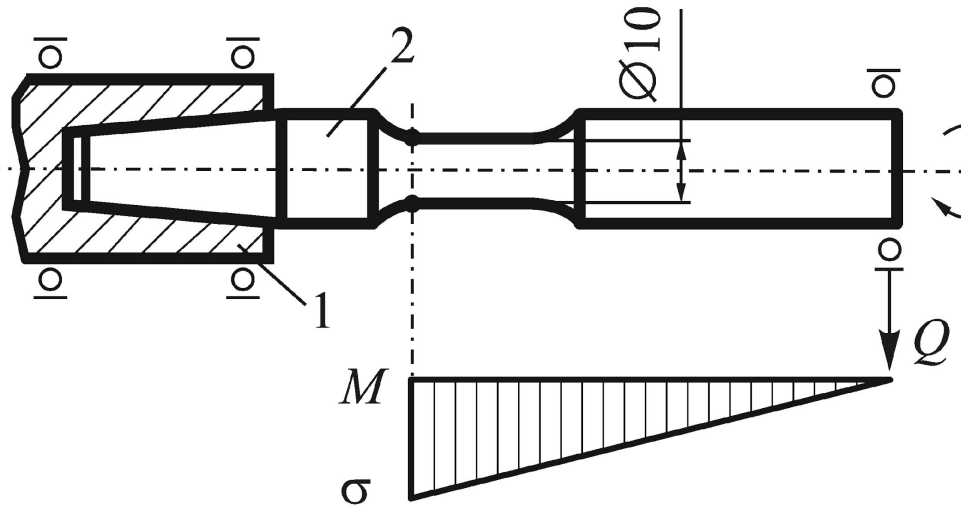
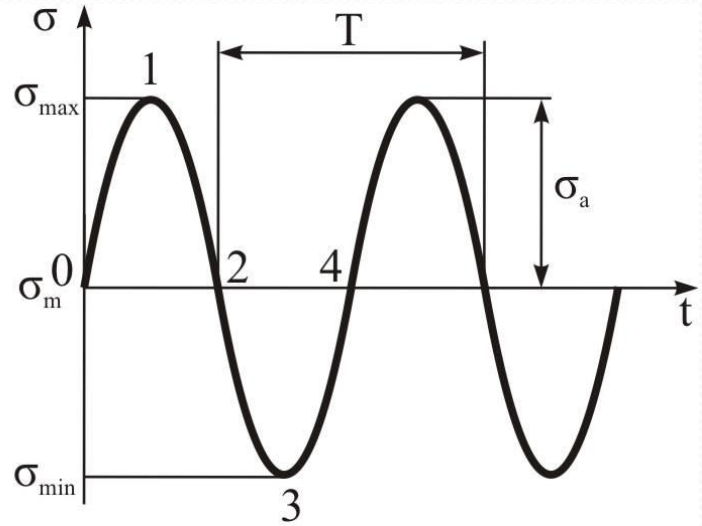
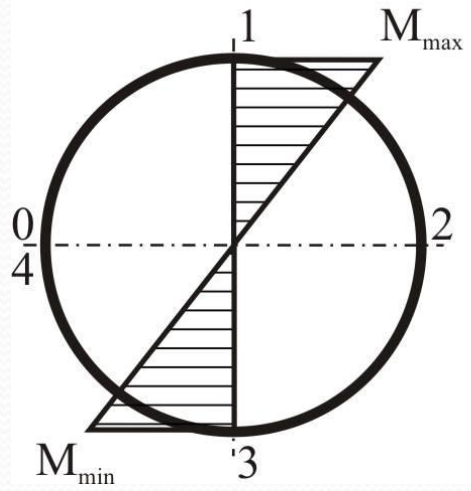


Схема испытаний стального образца на механическую усталость: 1 - образец; 2 - шпindel испытательной машины

Цикл напряжений при испытаниях на механическую усталость





# 29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.



## Коэффициент асимметрии цикла

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1; \quad \sigma_{\min} = -\sigma_{\max} = -\sigma_a \quad (4.1)$$

## Взаимосвязь напряжений цикла

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + (-\sigma_{\min})}{2} = 0; \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - (-\sigma_{\min})}{2} = \sigma_{\max}$$

## Расчет напряжений, ведут по формуле

$$\sigma_a = \sigma_{\max} = M/W, \quad (4.2)$$

где  $M = QL$  – изгибающий момент в опасном сечении образца, Н·м;

$W = \pi d^3/32$  – момент сопротивления опасного сечения образца, м<sup>3</sup>;

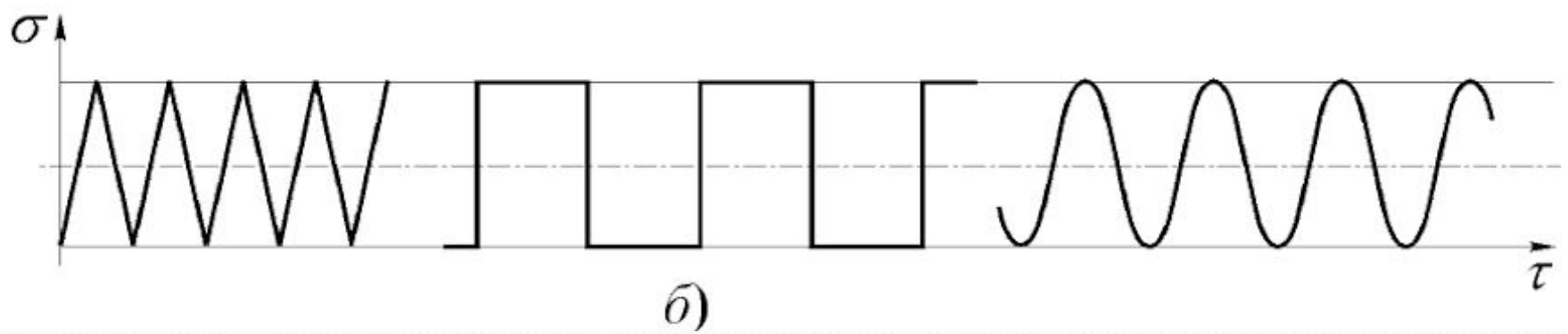
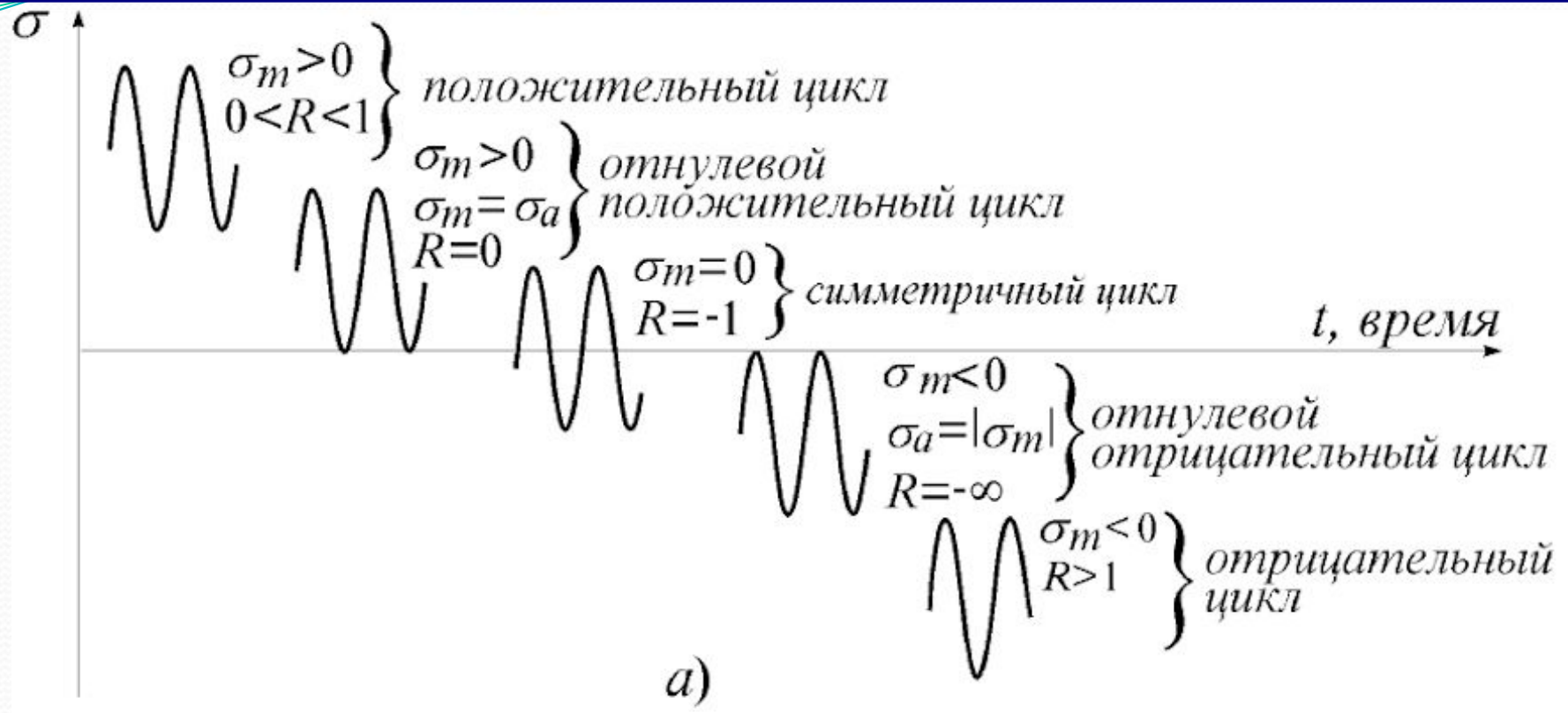
$Q$  – изгибающая нагрузка, Н;

$L$  – расстояние от оси приложения изгибающей нагрузки до опасного сечения образца, мм;

$d$  – диаметр рабочей части образца.

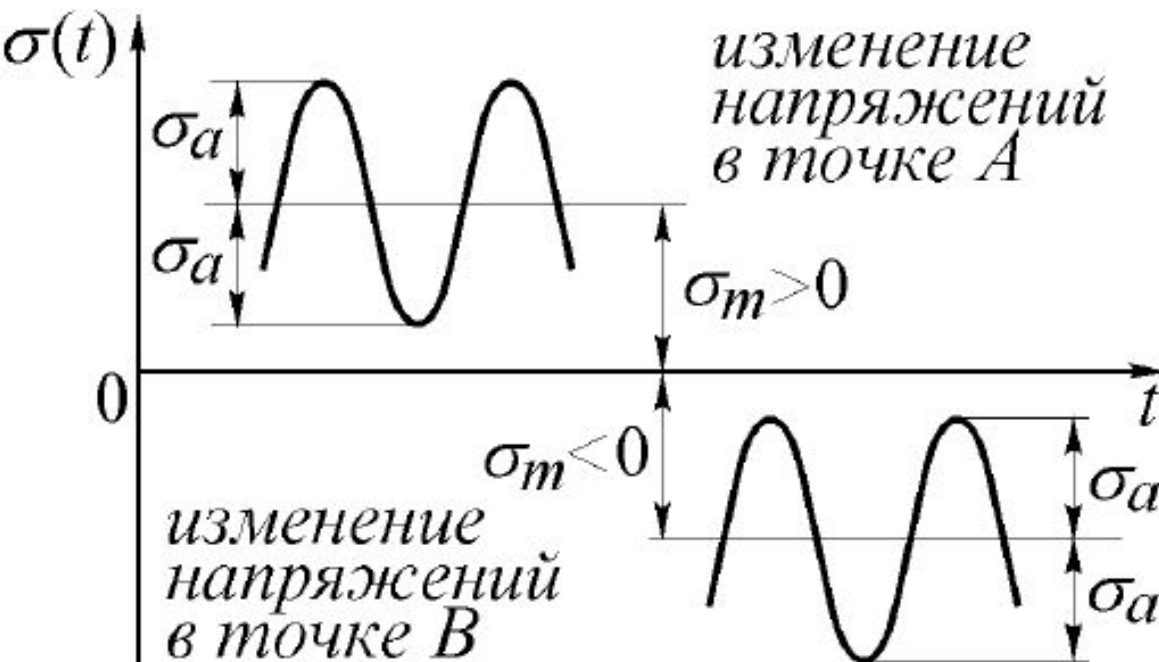
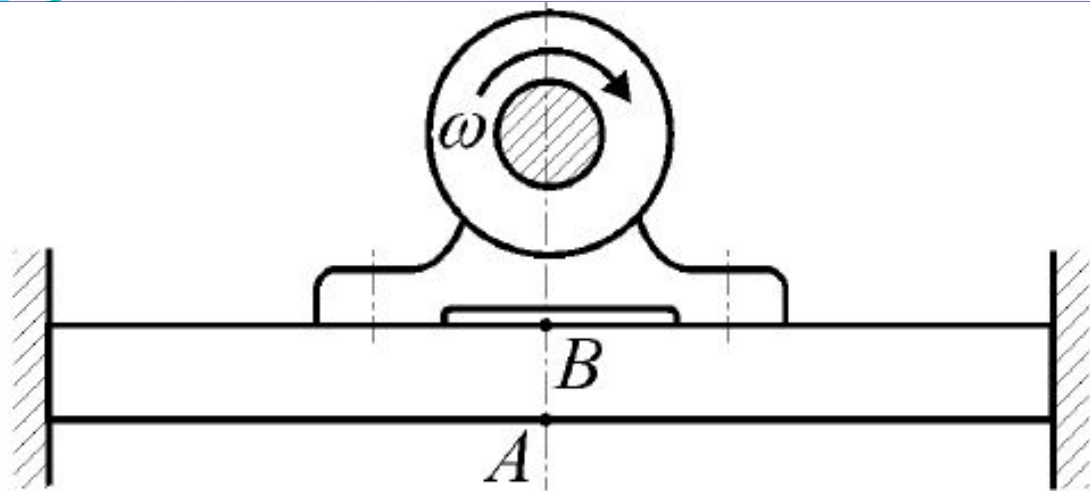


# 29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.





# 29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.



Циклы напряжений в реальных деталях машин

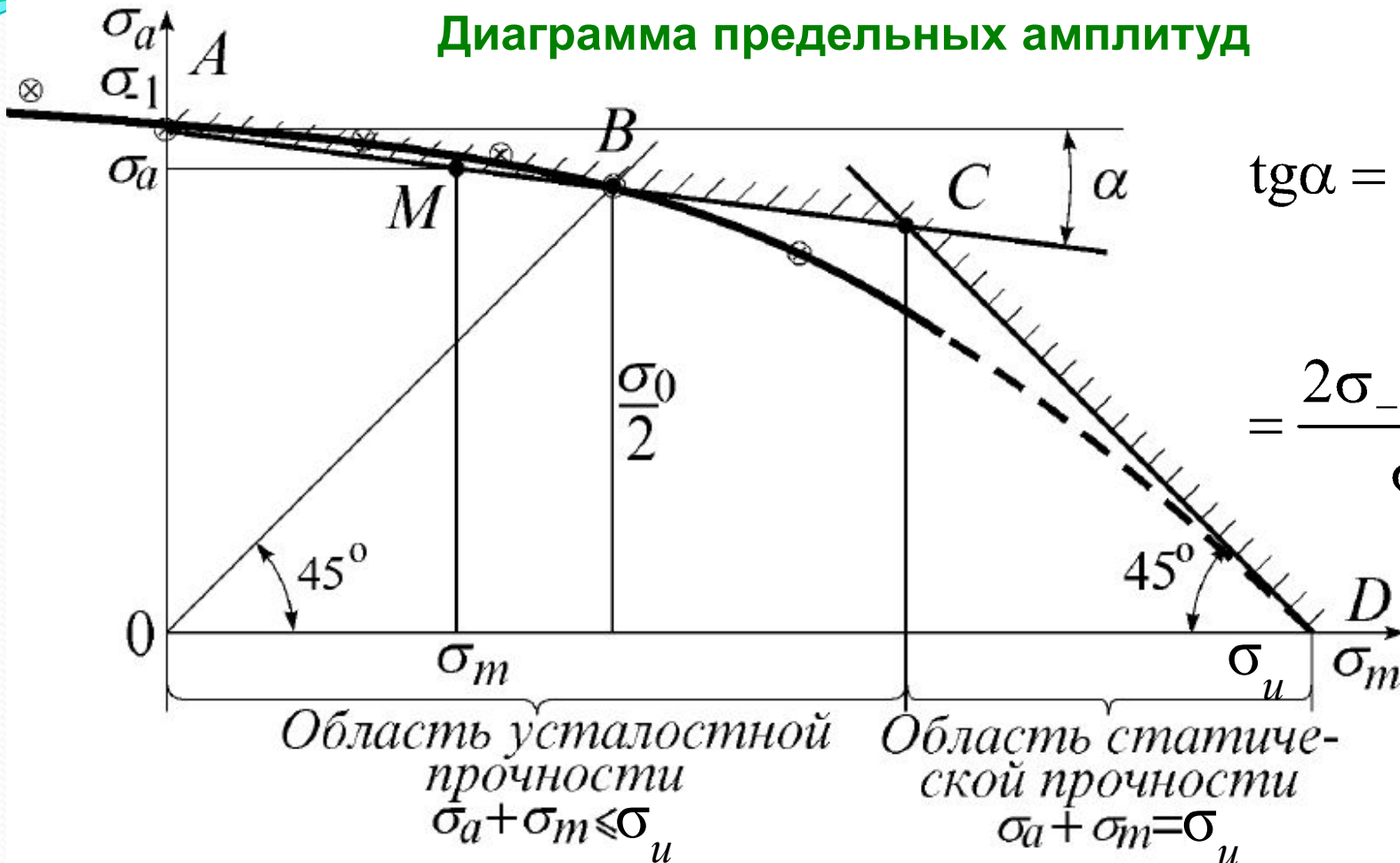




# 29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.



Диаграмма предельных амплитуд



$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{\sigma_{-1} - \frac{\sigma_0}{2}}{\frac{\sigma_0}{2}} = \\ &= \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} = \psi_{\sigma}. \end{aligned}$$

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \sigma_m \operatorname{tg} \alpha.$$

$$\sigma_a + \sigma_m \psi_{\sigma} = \sigma_{-1}.$$

$$\frac{1}{n_R^2} = \frac{1}{n_{\sigma}^2} + \frac{1}{n_{\tau}^2}$$

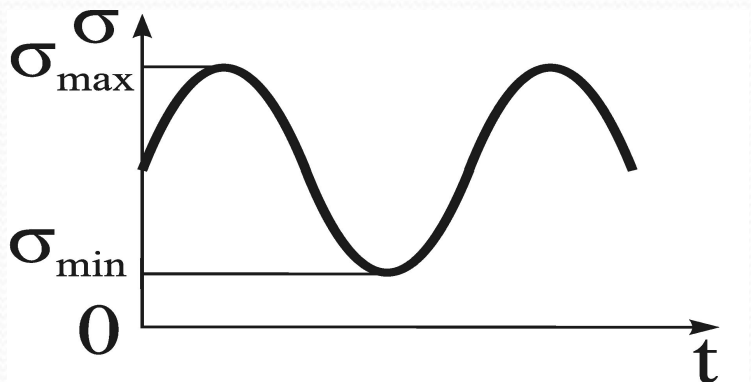
формула Гафа-Полларда



# 29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.



## Приведение асимметричного цикла к симметричному

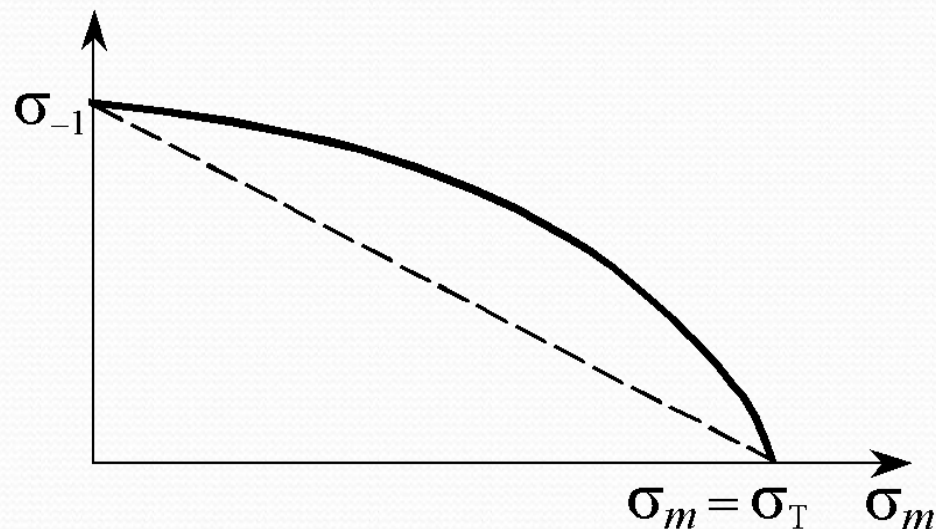


Несимметричный цикл

$$\sigma_{-1} = \frac{\lim \sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y}} = \frac{\sigma_R}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_y}}. \quad (4.3)$$

$$\sigma_{-1} = \lim \sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m. \quad (4.4)$$

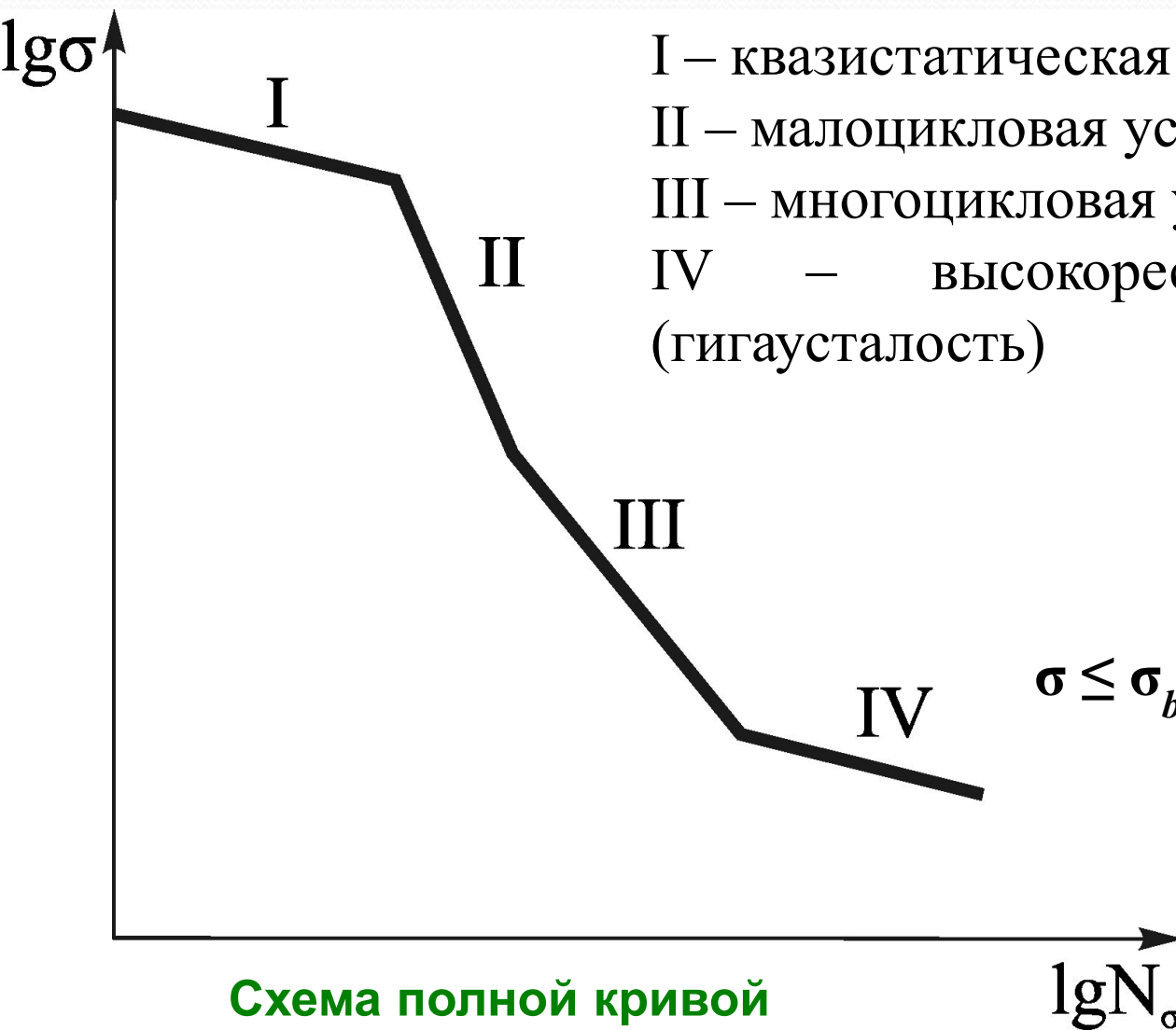
$$\lim \sigma_a = \sigma_R$$



Зависимость предельной амплитуды  $\lim \sigma_a$  от среднего значения  $\sigma_m$  напряжений цикла



## 29.2 КРИВАЯ УСТАЛОСТИ И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.



I – квазистатическая усталость

II – малоцикловая усталость

III – многоцикловая усталость

IV – высокоресурсная усталость  
(гигаусталость)

$\sigma \leq \sigma_b$  и  $1 \leq N_\sigma < 10^9$  циклов

Схема полной кривой  
механической усталости



# ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ (МНОГОЦИКЛОВОЙ) УСТАЛОСТИ

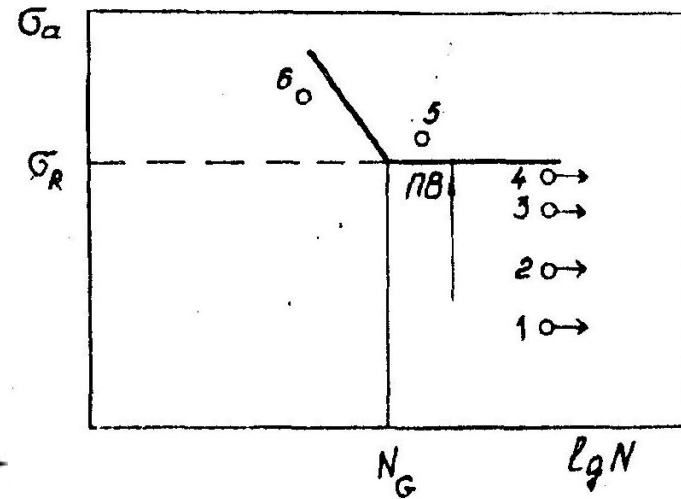
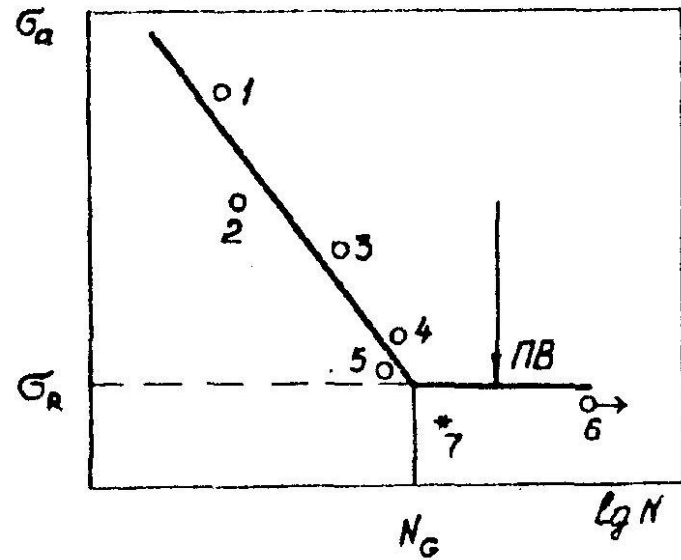
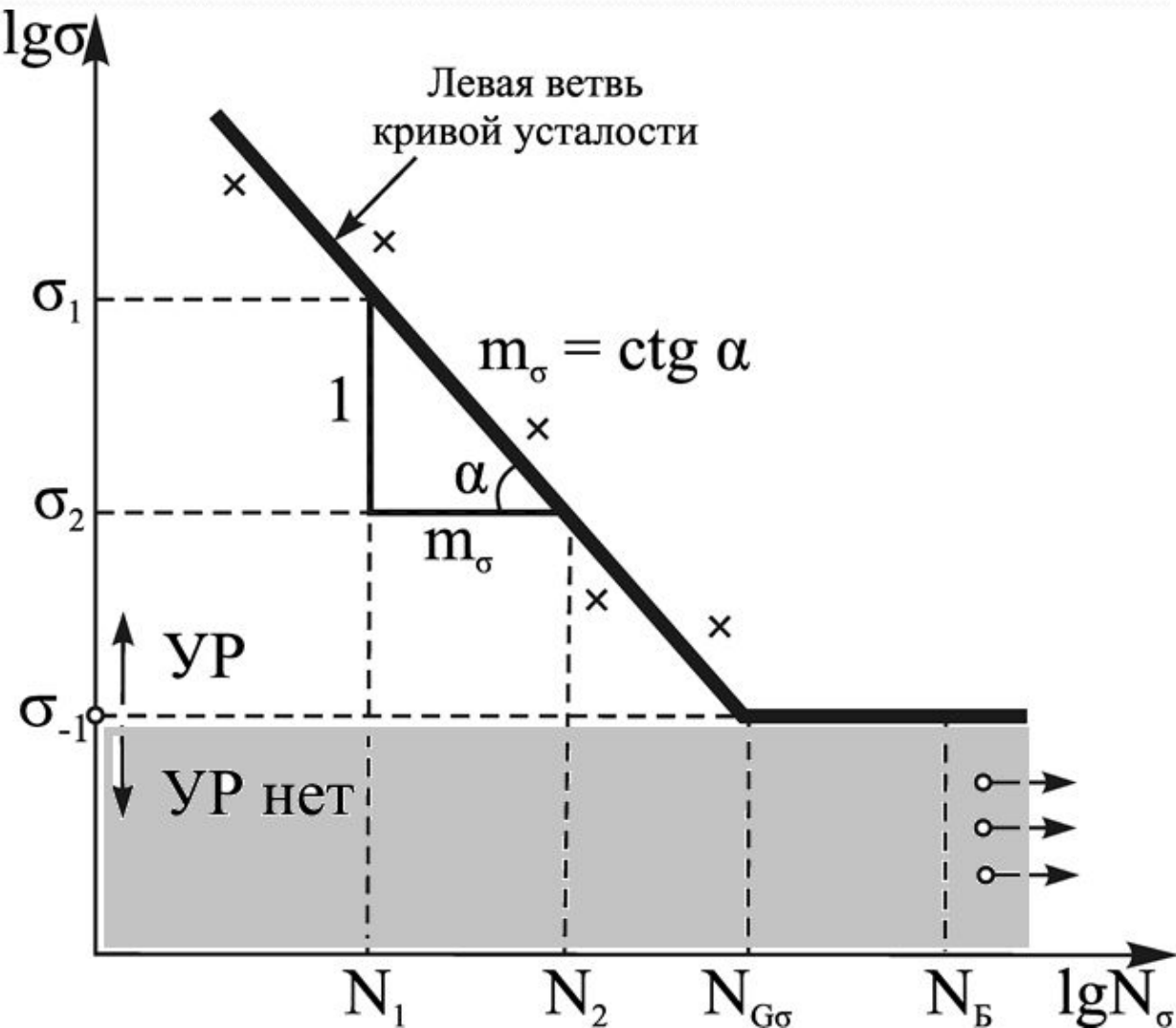


Схема кривой механической усталости в многоцикловой области (S-N-кривая, кривая Вёлера)

## 29.2 КРИВАЯ УСТАЛОСТИ И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.

13

**Уравнение кривой механической усталости:**

$$\sigma^{m_\sigma} \cdot N_\sigma = C_\sigma = \text{const} = \sigma_{-1}^{m_\sigma} N_{G\sigma}, \quad (4.5)$$

где  $C_\sigma$  константа сопротивления усталости.

**Показатель наклона кривой механической усталости**

$$m_\sigma = \text{ctg } \alpha = \frac{\lg N_2 - \lg N_1}{\lg \sigma_1 - \lg \sigma_2} \quad (4.6)$$

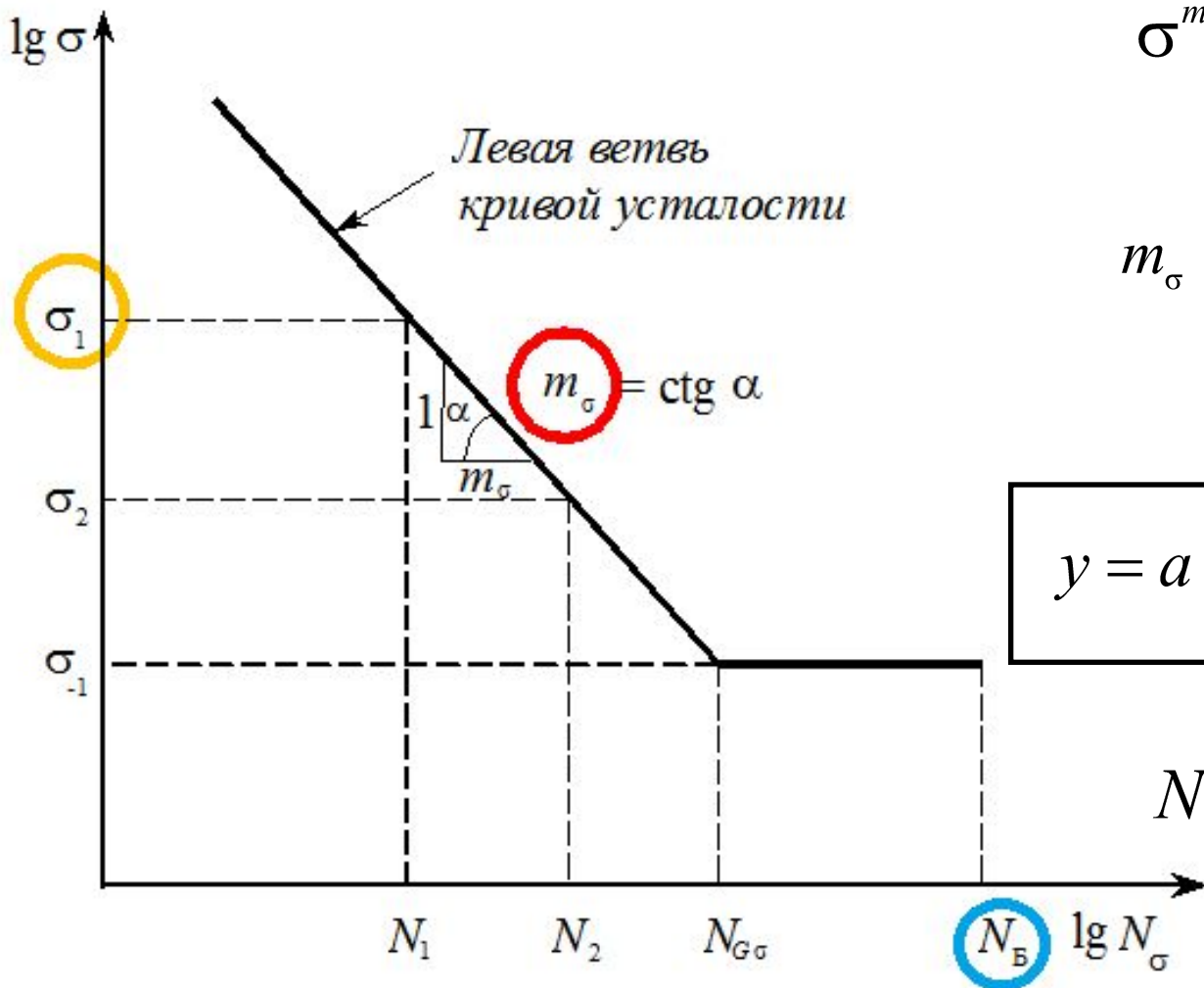
$$\begin{array}{l} \sigma_1 \rightarrow \sigma; \sigma_2 \rightarrow \sigma_{-1} \\ N_1 \rightarrow N; N_2 \rightarrow N_{G\sigma} \end{array} \quad \longrightarrow \quad m_\sigma = \frac{\lg N_{G\sigma} - \lg N}{\lg \sigma - \lg \sigma_{-1}}.$$

$$m_\sigma = \frac{\lg \frac{N_{G\sigma}}{N}}{\lg \frac{\sigma}{\sigma_{-1}}}; \quad \lg \frac{N_{G\sigma}}{N} = m_\sigma \cdot \lg \frac{\sigma}{\sigma_{-1}};$$

$$N_\sigma = N_{G\sigma} \cdot \left( \frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right)^{m_\sigma} = \frac{C}{\sigma^{m_\sigma}}. \quad (4.7)$$



# ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ (МНОГОЦИКЛОВОЙ) УСТАЛОСТИ



$$\sigma^{m_\sigma} N_\sigma = C_\sigma = \text{const}$$

$$m_\sigma = \text{ctg} \alpha = \frac{\lg N_2 - \lg N_1}{\lg \sigma_1 - \lg \sigma_2}$$

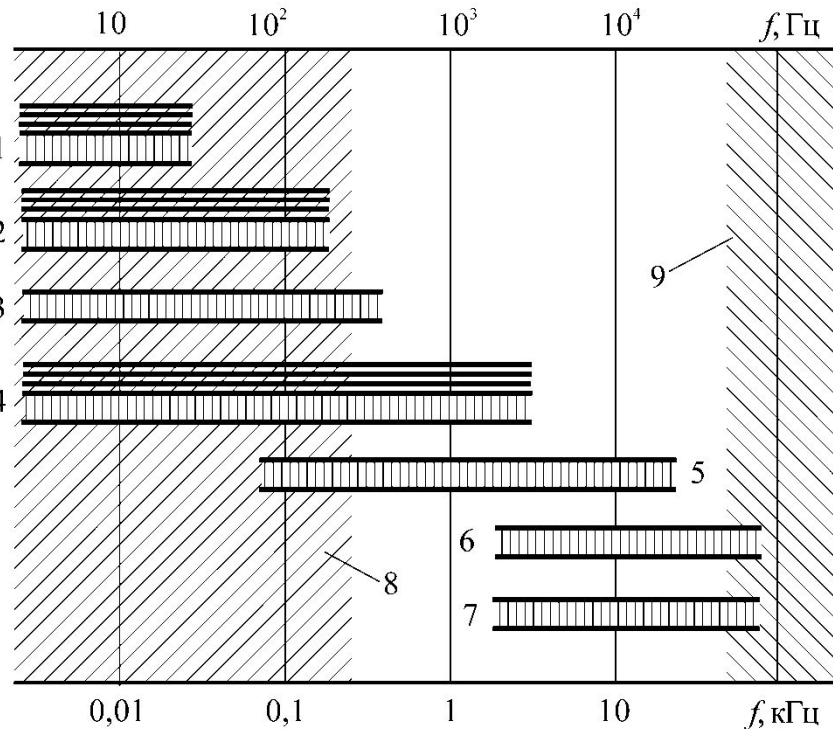
$$y = a \cdot x; \quad y = \lg \sigma \quad x = \lg N_\sigma$$

$$N_\sigma = \left( \frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right)^{m_\sigma} \quad N_{G\sigma} = \frac{C_\sigma}{\sigma^{m_\sigma}}$$

$N_B$   $\lg N_\sigma$

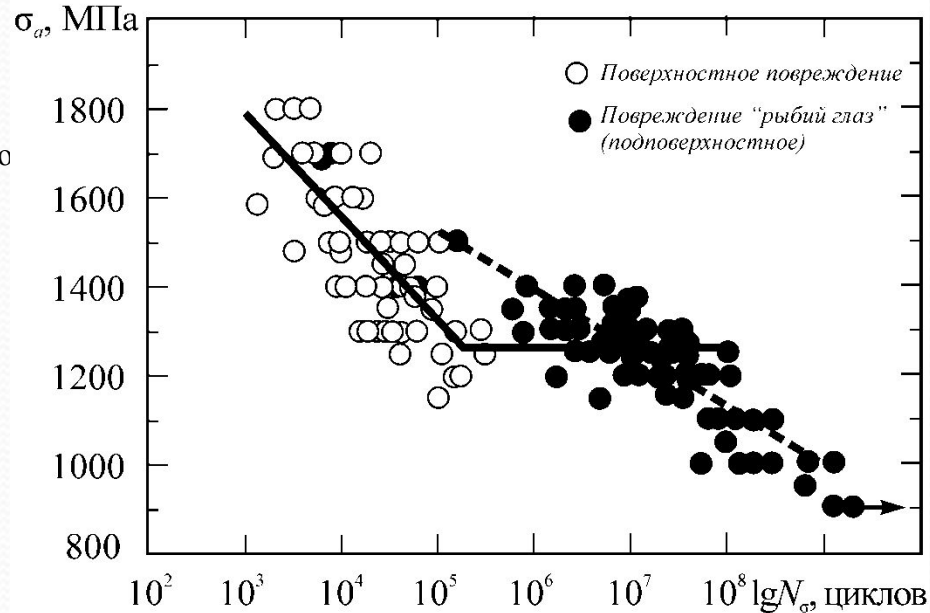
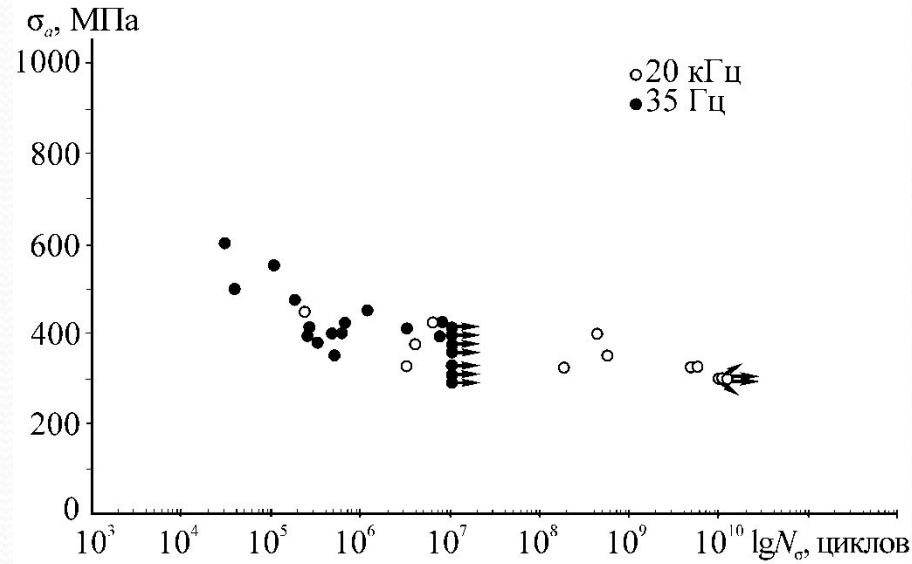


# ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ (МНОГОЦИКЛОВОЙ) УСТАЛОСТИ



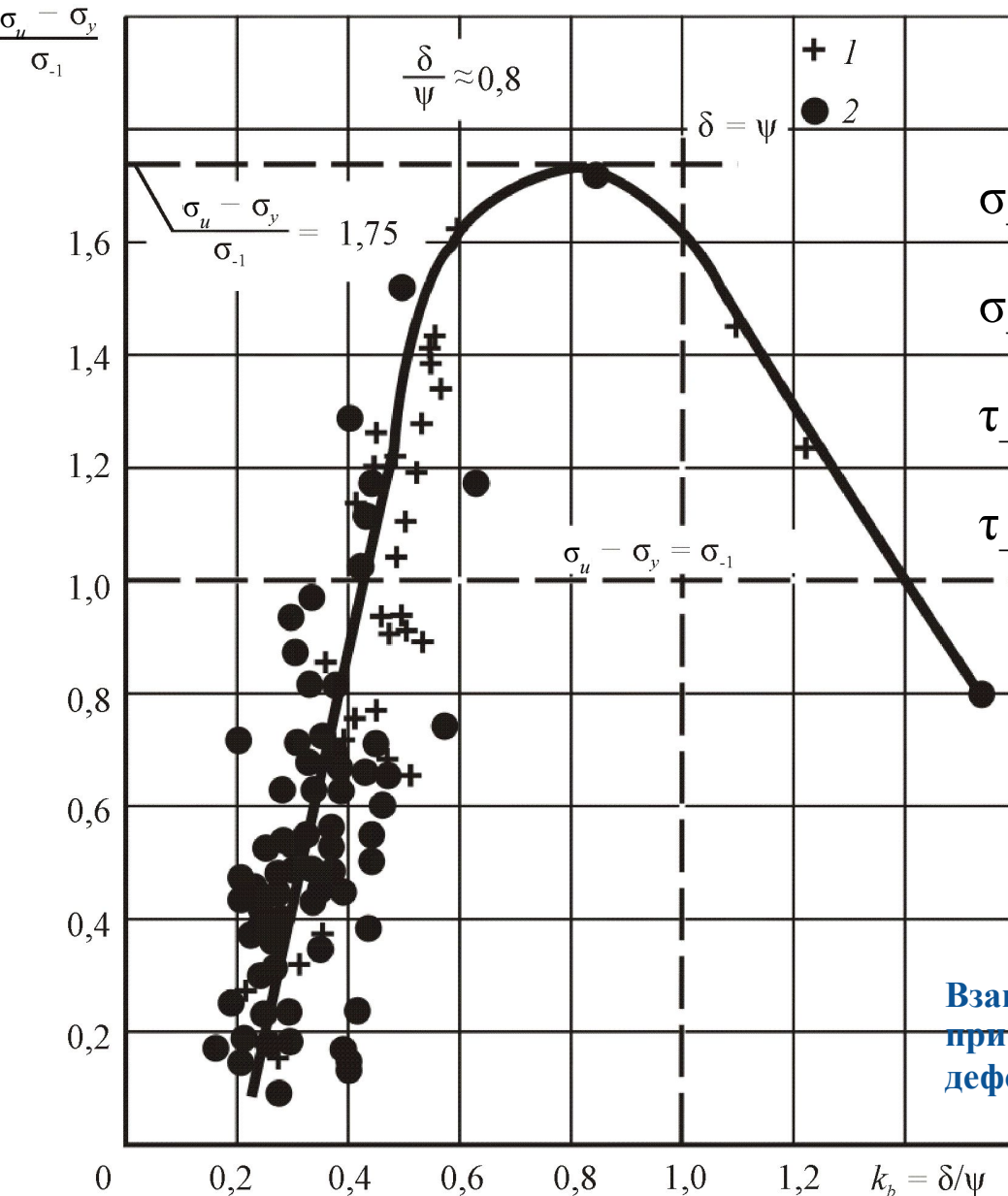
Способы возбуждения циклических нагрузок в зависимости от часто испытаний:

- 1 – механическое и гидравлическое силовозбуждение;
- 2 – электрогидравлическое силовозбуждение;
- 3 – электромагнитное силовозбуждение;
- 4 – электродинамическое силовозбуждение;
- 5 – пневматическое и акустическое силовозбуждение;
- 6 – магнитострикционное силовозбуждение;
- 7 – пьезоэлектрическое силовозбуждение;
- 8 – низкочастотные испытания;
- 9 – верхняя граница реализуемых высокочастотных испытаний





# ВЗАИМОСВЯЗЬ СВОЙСТВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ



$$\sigma_{-1} = (0,4 \dots 0,6) \sigma_u,$$

$$\sigma_{-1} = 1,65 \text{ НВ}$$

$$\tau_{-1} = (0,5 \dots 0,6) \sigma_{-1}$$

$$\tau_{-1} \approx 0,27 \sigma_u$$

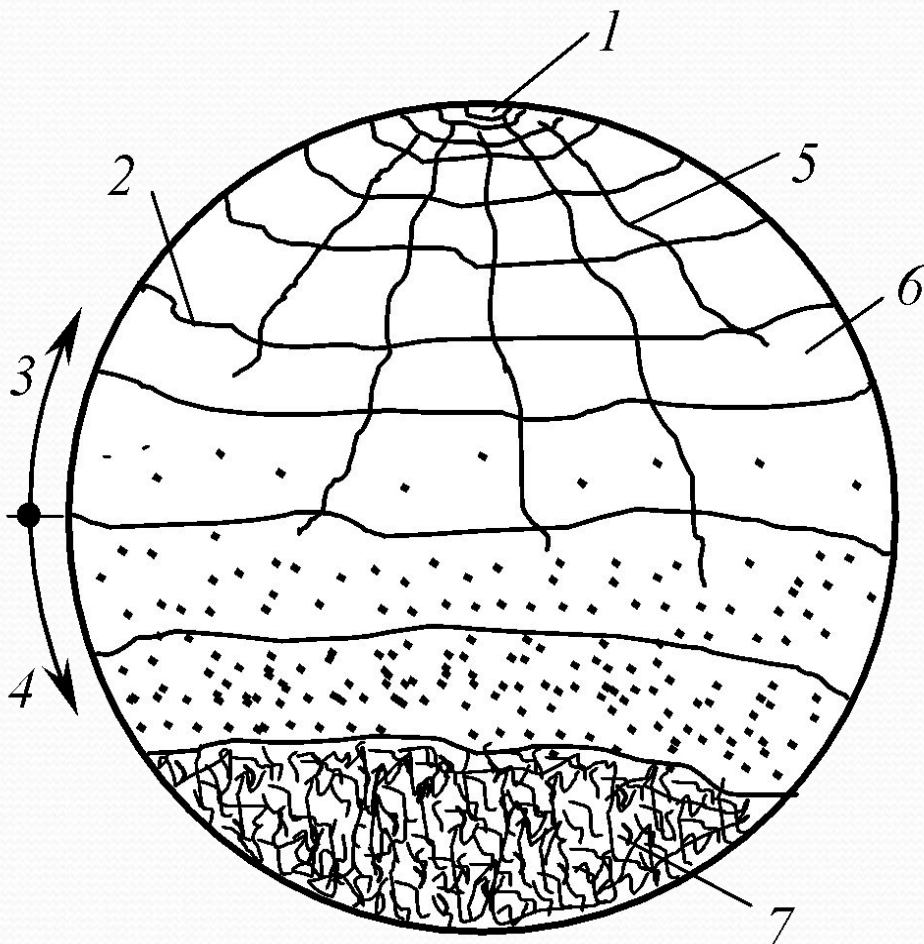
$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_u - \sigma_y}{0,75 \left[ \frac{\delta}{\psi} \left( 7,5 - 4,167 \frac{\delta}{\psi} \right) - 1 \right]}$$

Взаимосвязь свойств при статическом и циклическом деформировании





## 29.3 УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. МЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ.



*Первичная усталостная трещина макроскопических размеров зарождается в очаге 1; здесь сопротивление материала разрушению оказывается наименьшим. По мере продвижения фронта 2 усталостной трещины вглубь на изломе обнаруживаются линии сброса 5, определяющие разные плоскости раздела 6. Зона 3 стабильного развития трещины переходит в зону 4 ее нестабильного роста, которая завершается мгновенным доломом (зона 7).*

Схема усталостного излома



# 29.3 УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. МЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ.

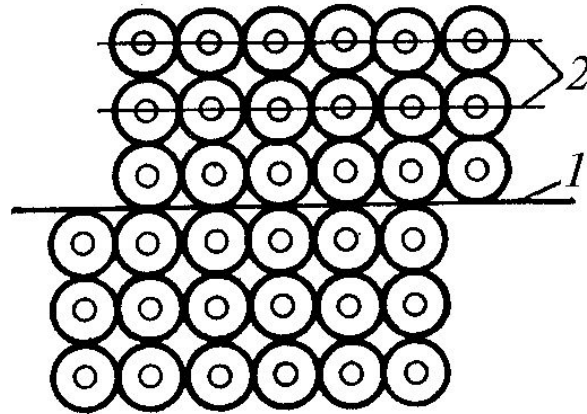
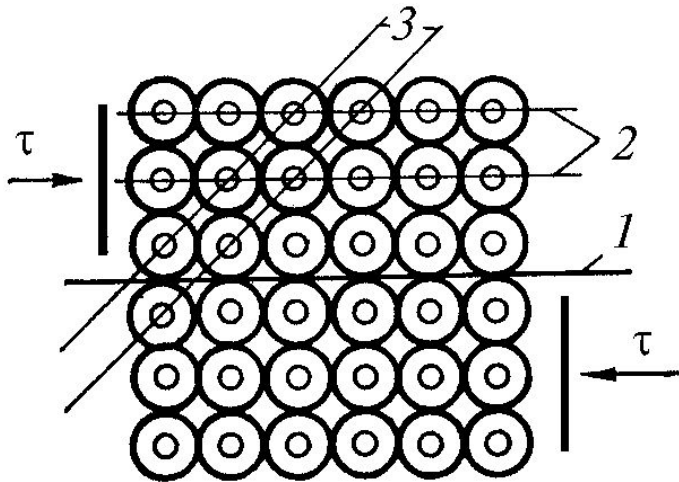
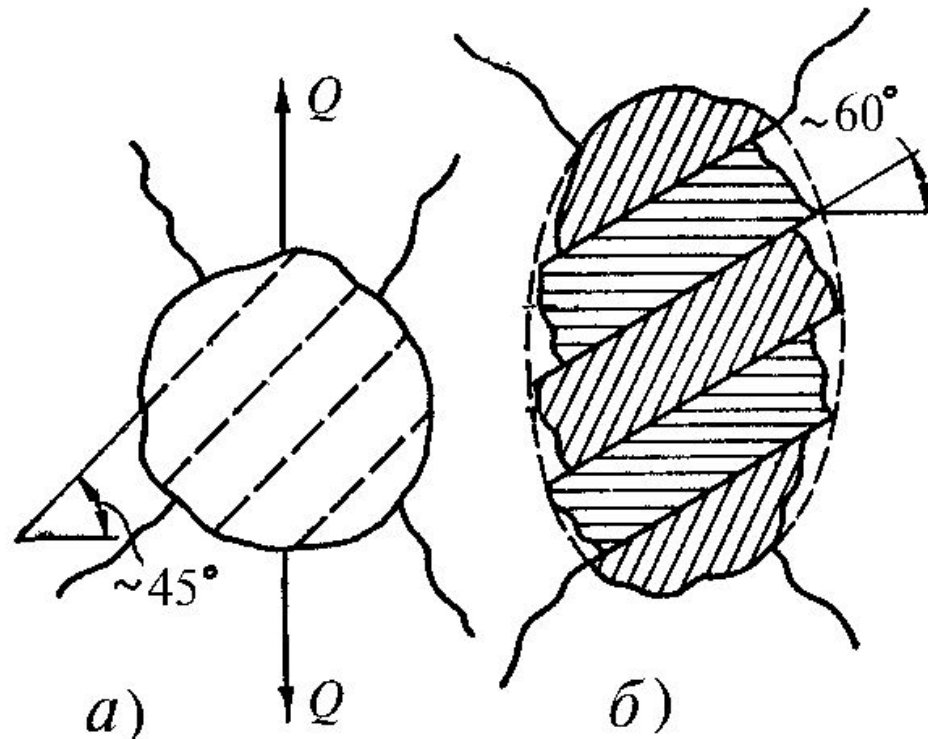


Схема смещения  
скольжением

Схема смещения  
двойникованием





# 29.3 УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. МЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ.

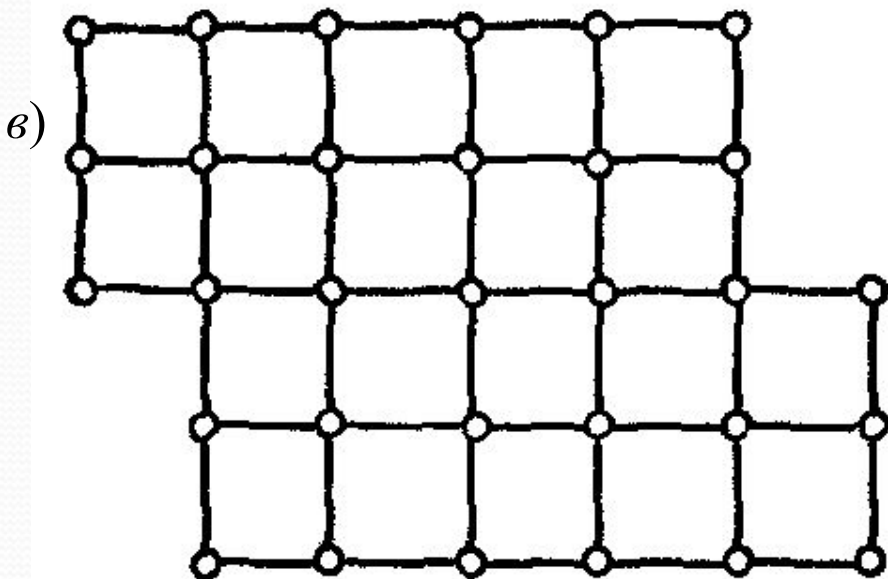
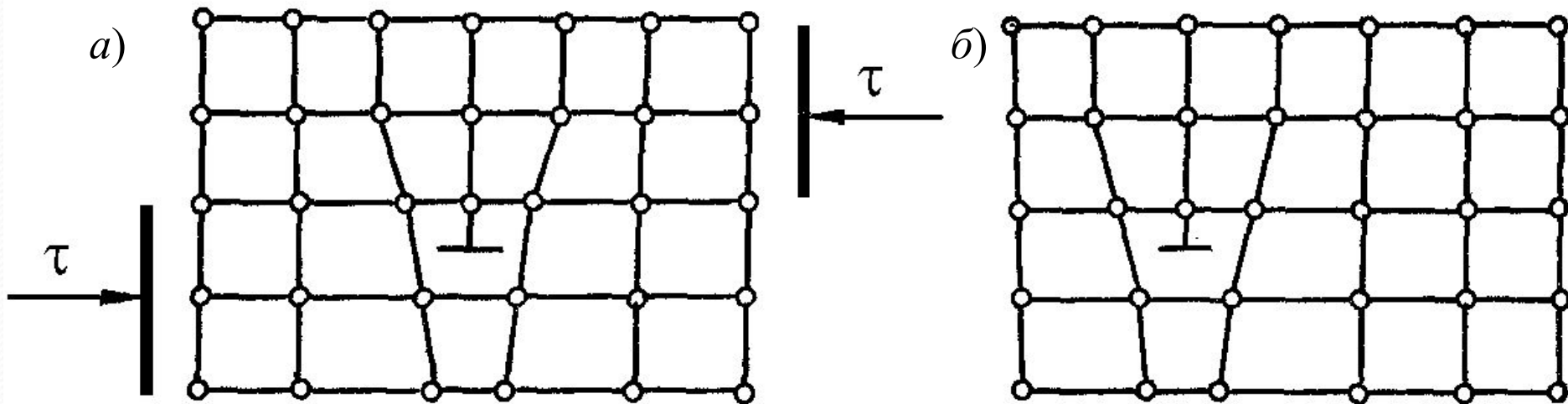
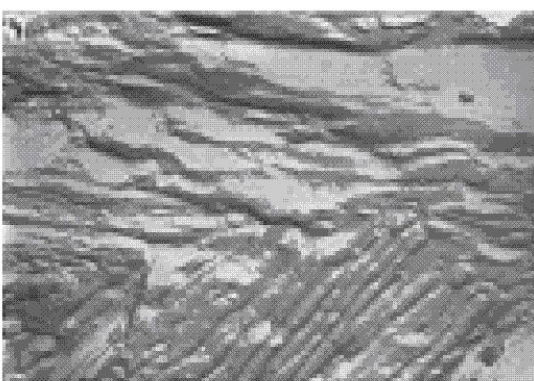
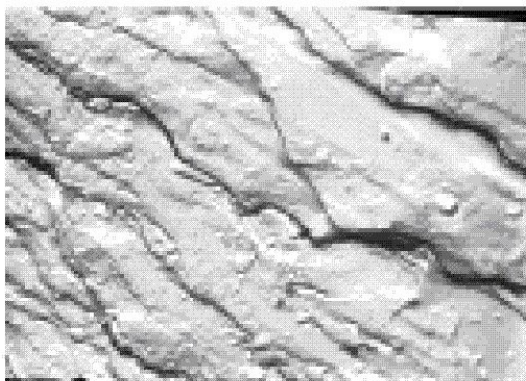
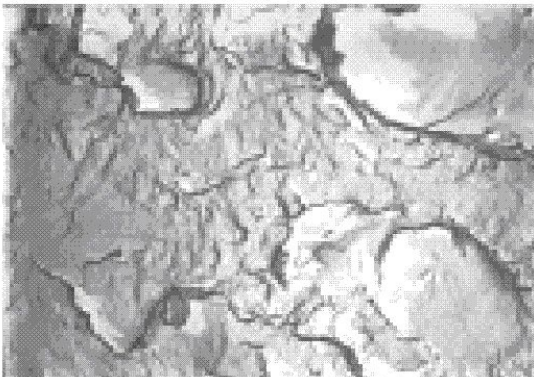
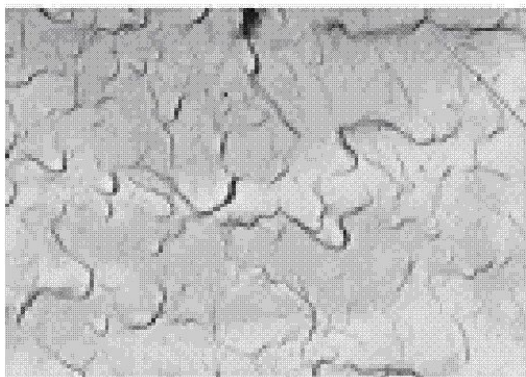
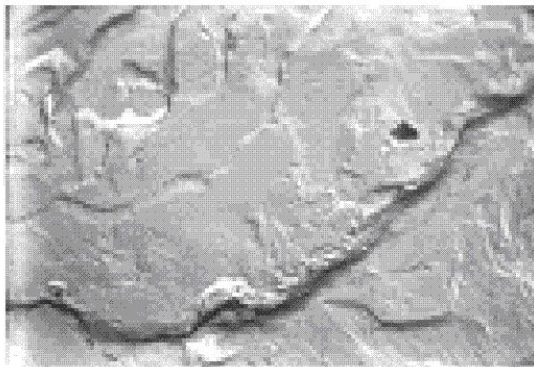
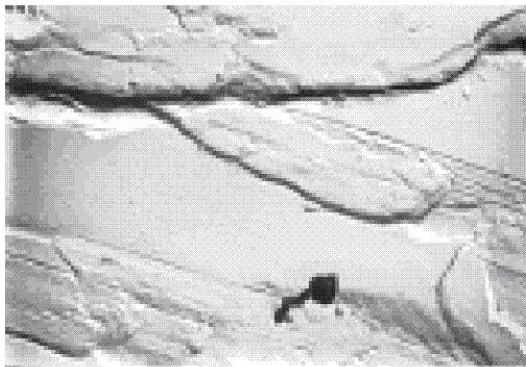


Схема перемещения  
краевой дислокации



# МИКРОМЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

20

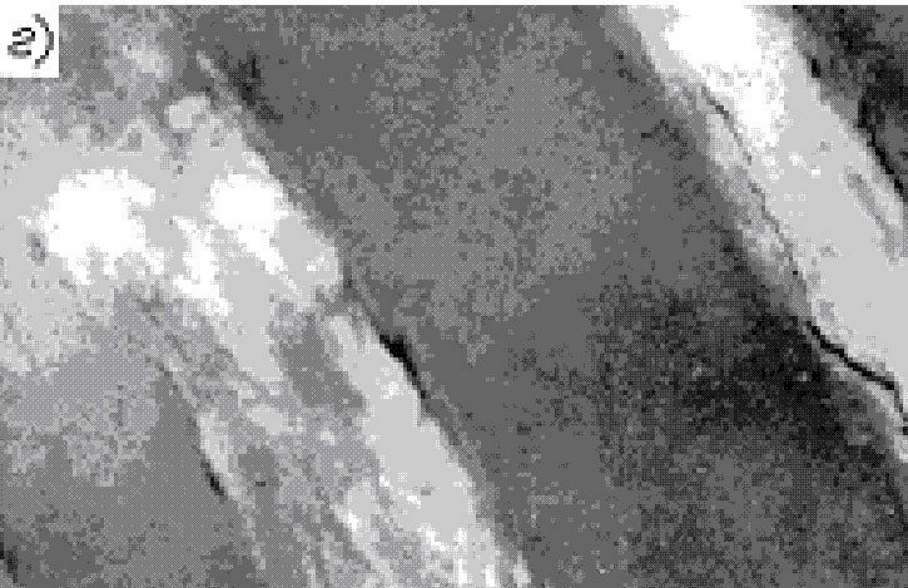
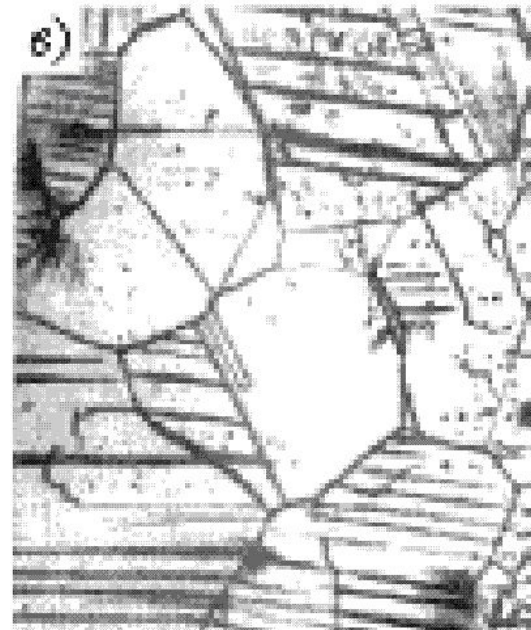
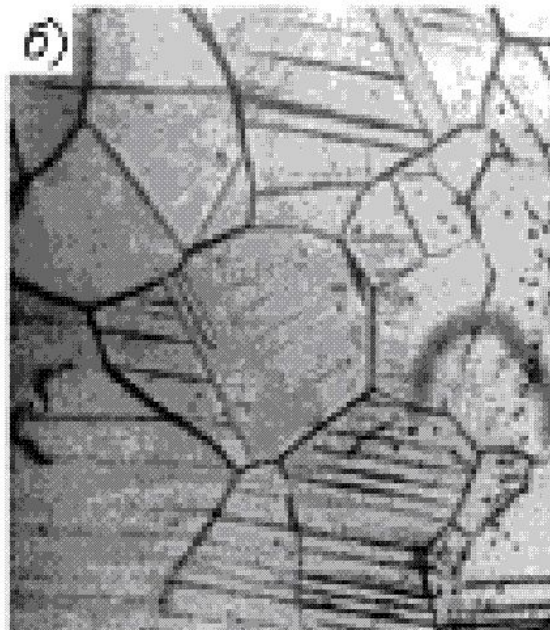
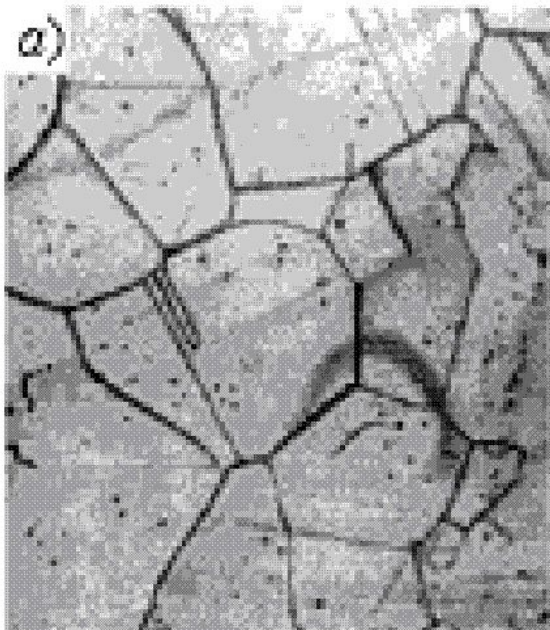


Характерные электронно-микроскопические фрактограммы поверхностей усталостного излома вала из стали 45 ( $\times 2000$ )



# МИКРОМЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ.

21



## Чистый никель на различных стадиях испытания на усталость:

*a* –  $n = 10^4$  циклов;

*б* –  $5 \cdot 10^4$  циклов;

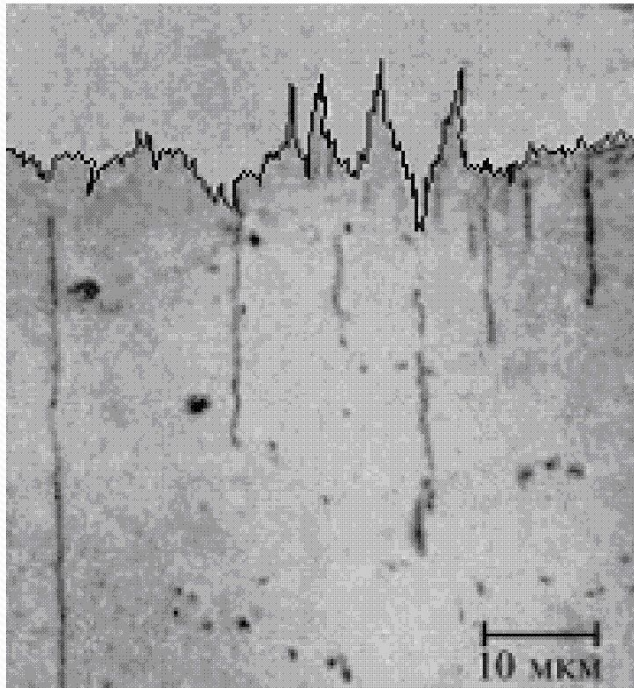
*в* –  $n = 2,7 \cdot 10^5$  циклов ( $\times 330$ );

*г* – электронограмма пачек скольжения в мягкой стали  
после  $1,9 \cdot 10^6$  циклов испытания при напряжении  
несколько ниже предела выносливости ( $\times 5800$ )

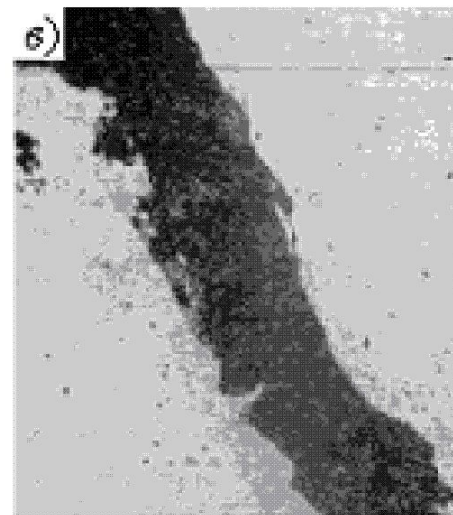
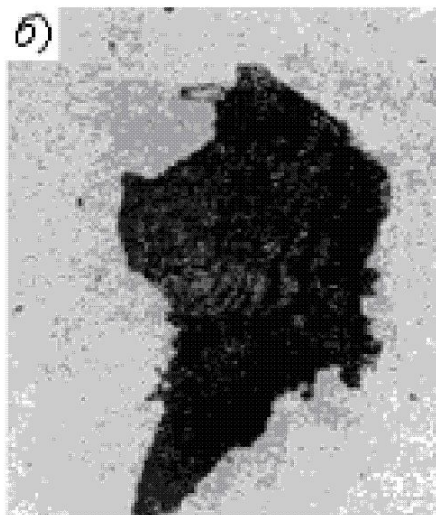
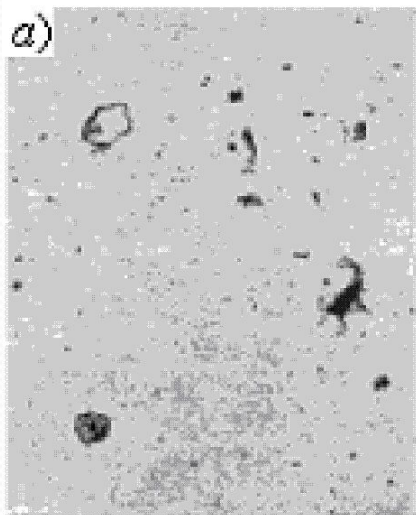


# МИКРОМЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

22



Экструзии и интрузии на поверхности образца, образовавшиеся в процессе усталостных испытаний



Типичные формы частиц усталостного разрушения ( $\times 100$ ):

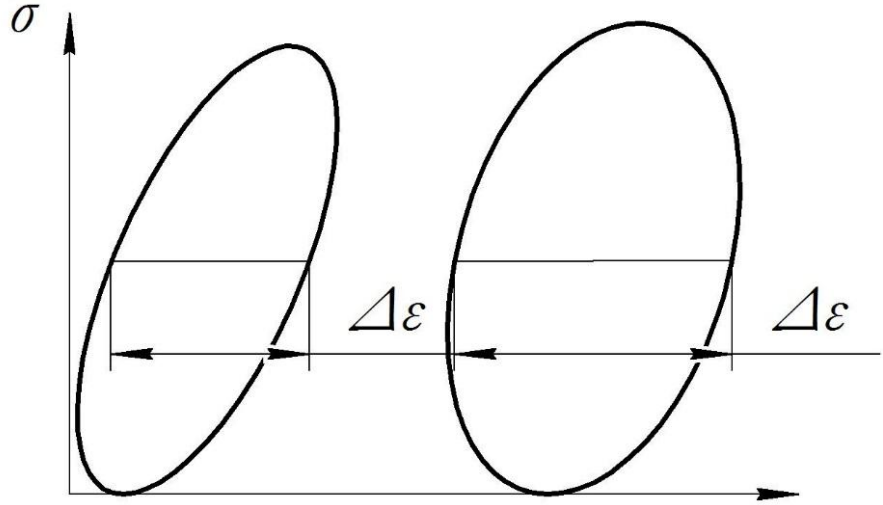
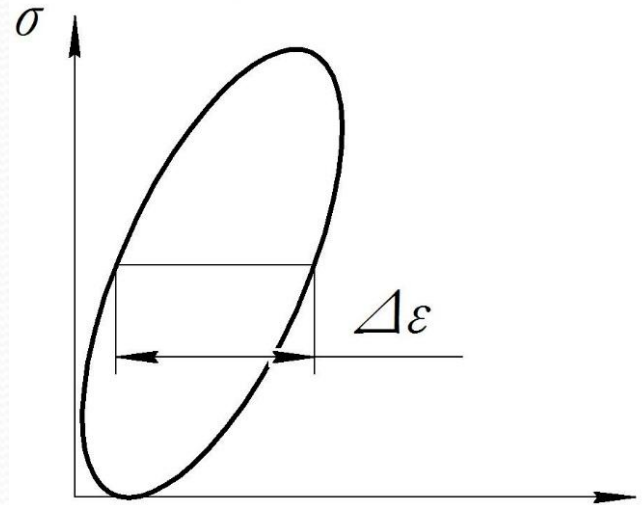
- a* – глобулы точечные и хлопьевидные,
- б* – округлые пластины,
- в* – вытянутые пластины



# УСТАЛОСТЬ И НЕУПРУГОСТЬ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

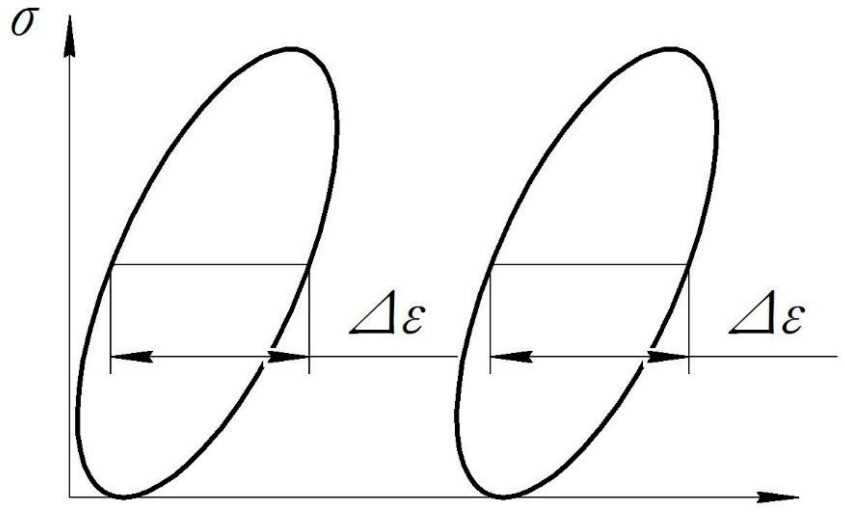
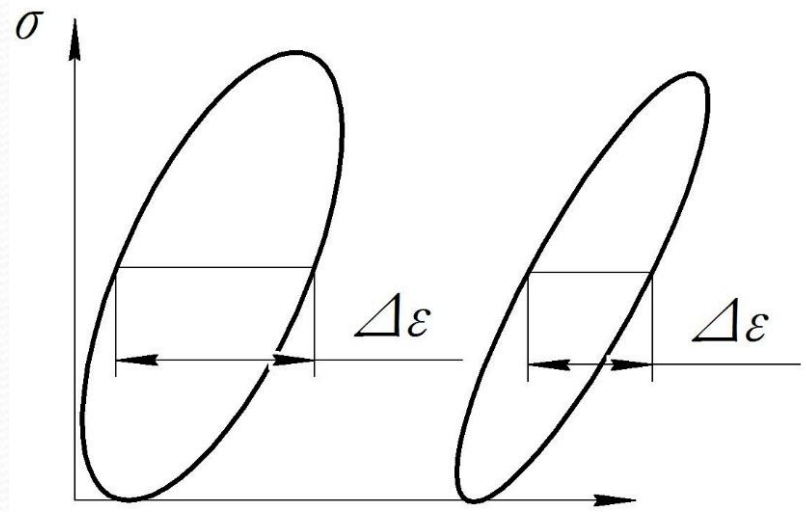
$\Delta\varepsilon$  - ширина петли гистерезиса

разупрочнение



упрочнение  $\varepsilon$

стабильное поведение  $\varepsilon$

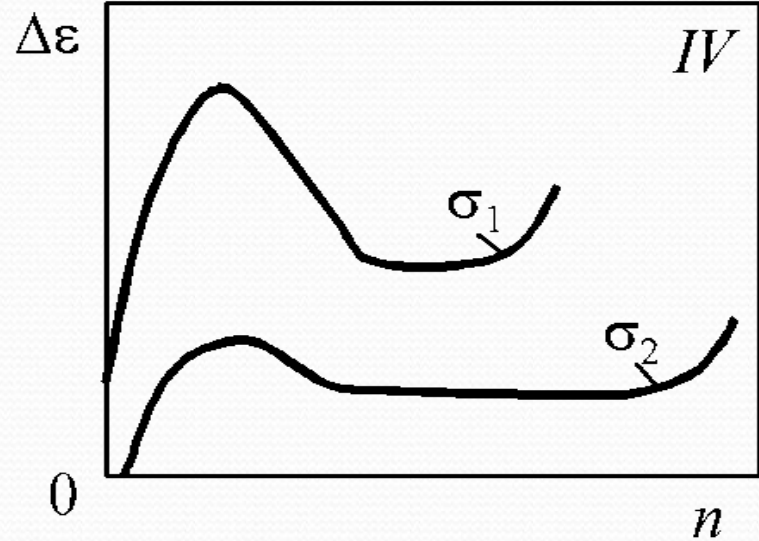
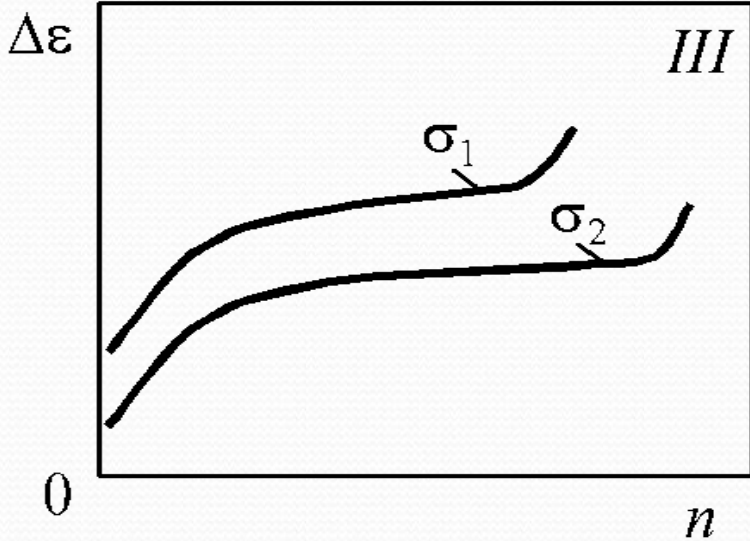
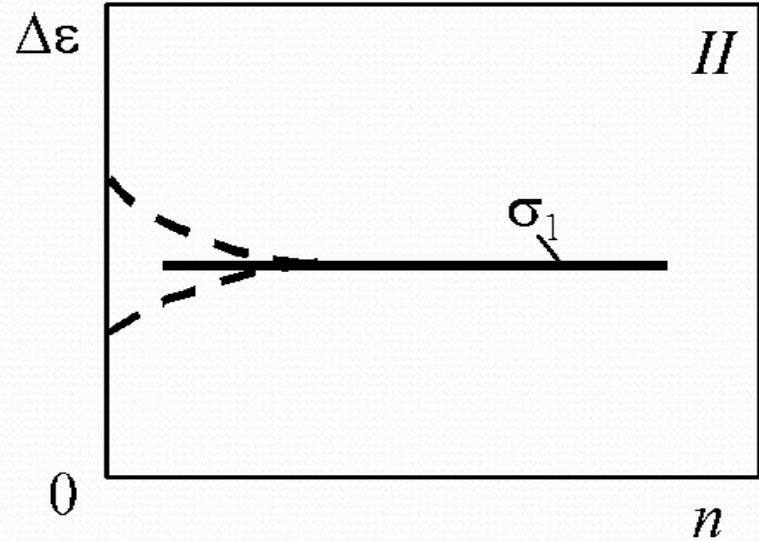
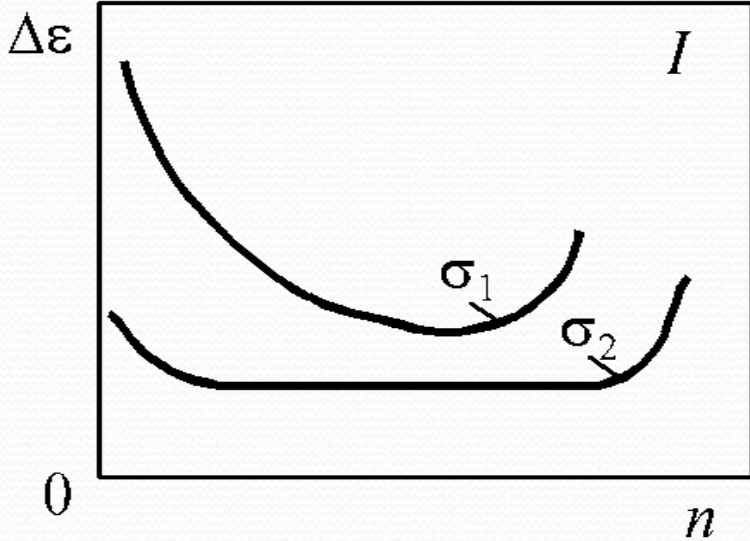


$\varepsilon$

$\varepsilon$



# 29.4 ЦИКЛИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ- РАЗУПРОЧНЕНИЕ

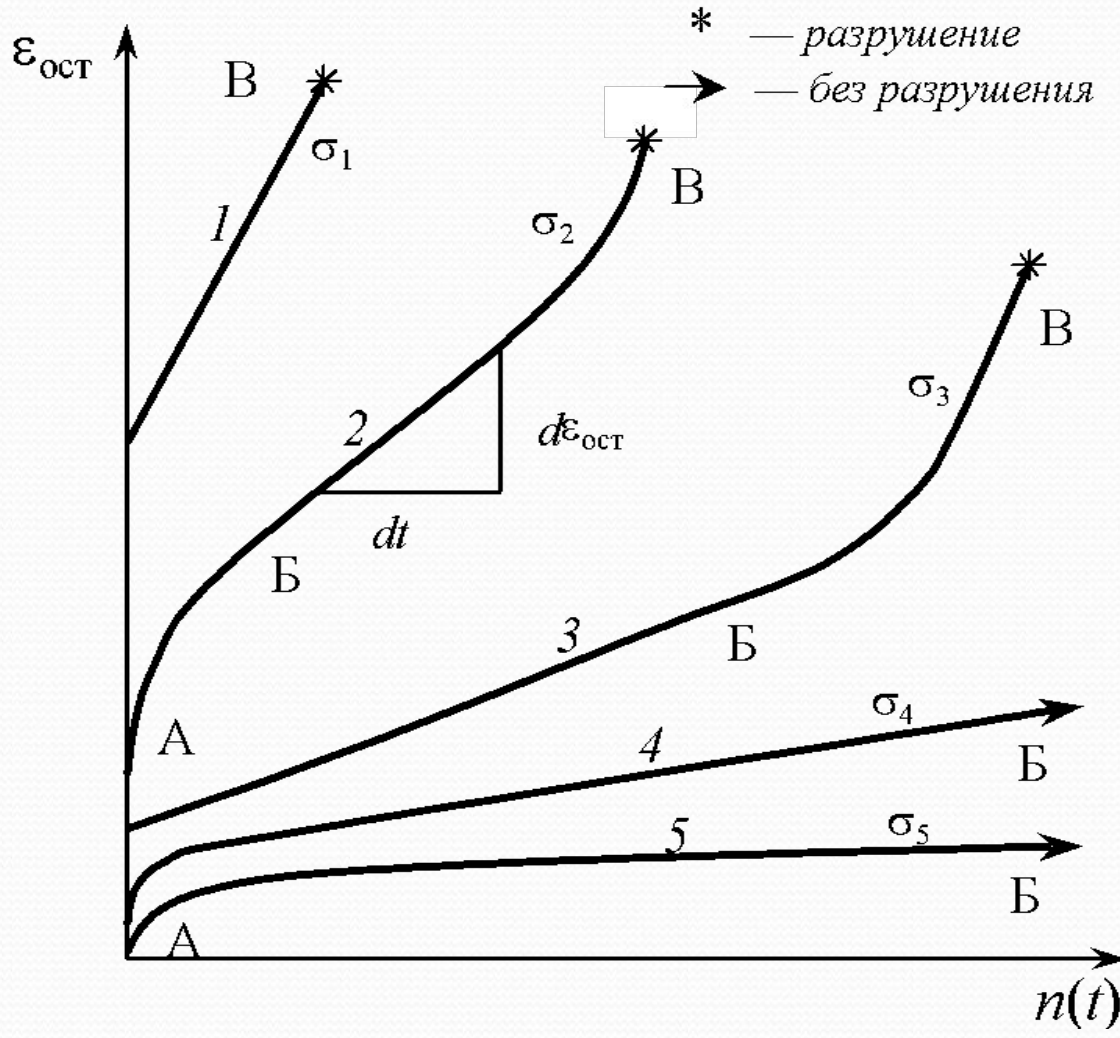


Различные виды зависимости неупругой деформации за цикл от числа циклов нагружения для металлов ( $\sigma_1 > \sigma_2$ )





# 29.5 ЦИКЛИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ-РАЗУПРОЧНЕНИЕ



Типичные кривые накопления остаточной (неупругой) деформации при действии циклических напряжений ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4 > \sigma_5$ .)



# ЛИНЕЙНАЯ ГИПОТЕЗА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

К пояснению правила  
линейного суммирования  
усталостных повреждений

Мера усталостного повреждения

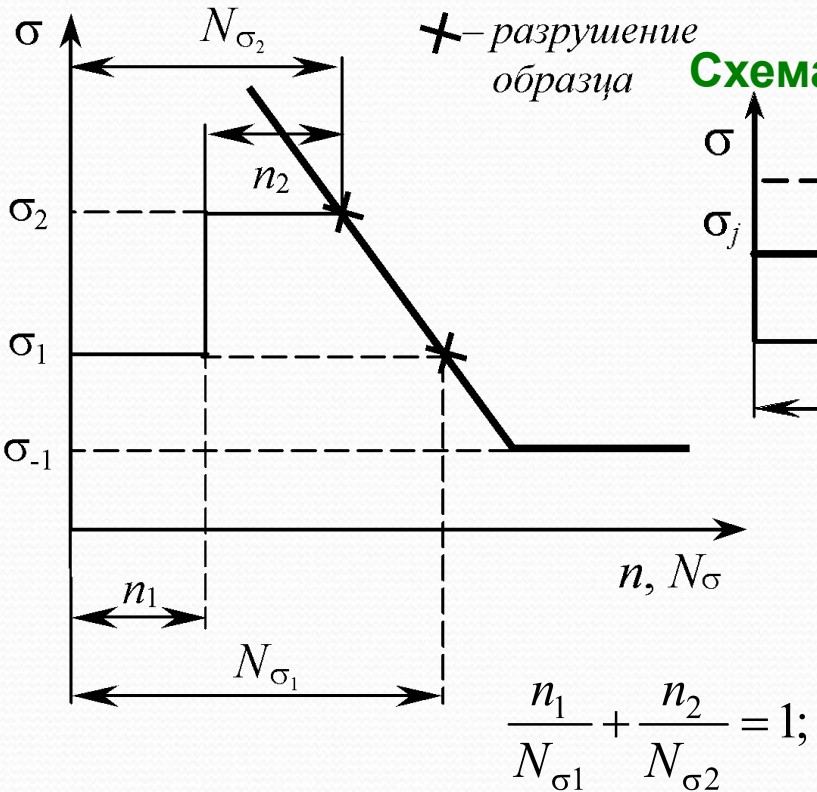
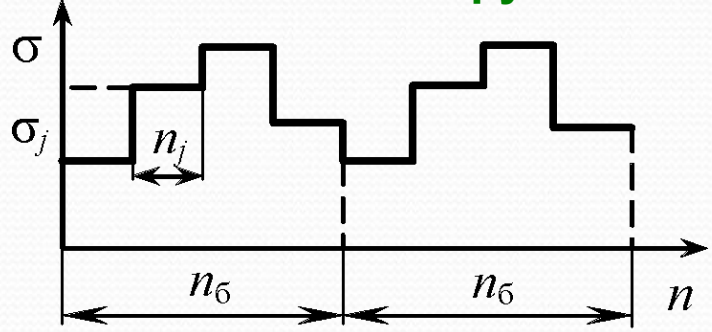


Схема блочного нагружения

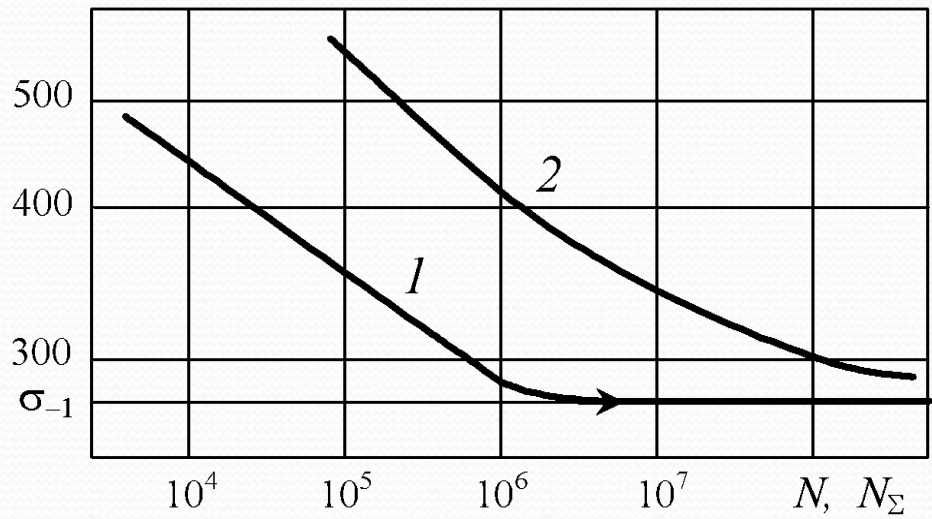


$$D_n = \frac{n_j}{N_{\sigma_j}}. \quad (4.8)$$

$$\lambda_{\sigma} \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_{\sigma_j}} = 1. \quad (4.9)$$

$$n_{\sigma} = \sum_{j=1}^k n_j. \quad (4.10)$$

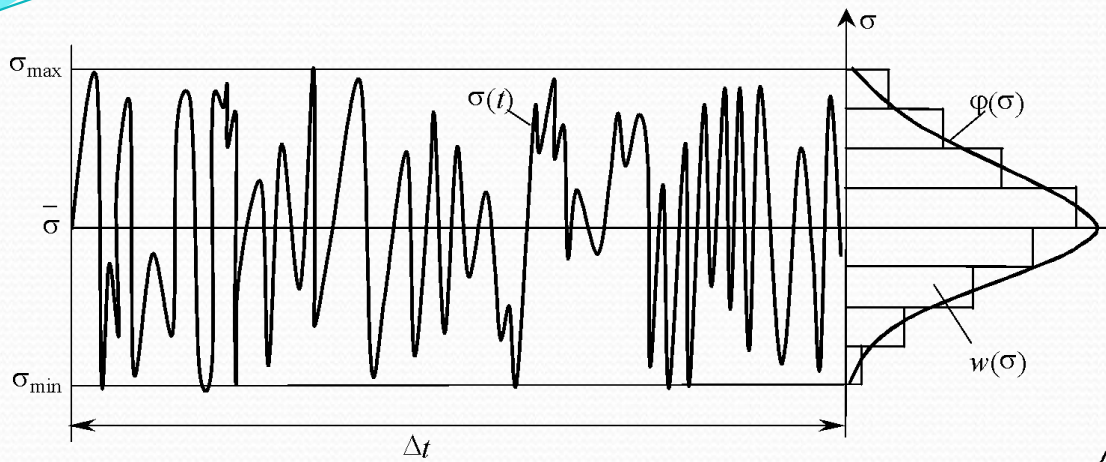
$\sigma_a; \sigma_{a \max}, \text{ МПа}$



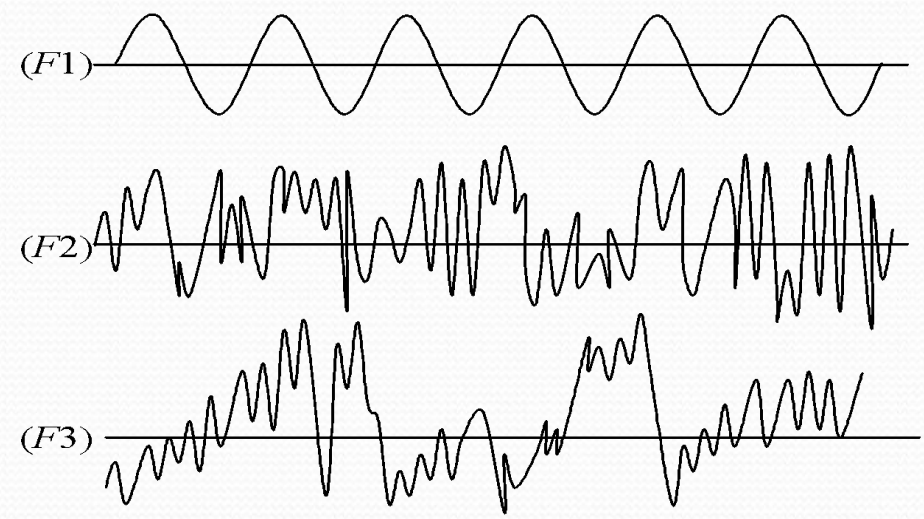
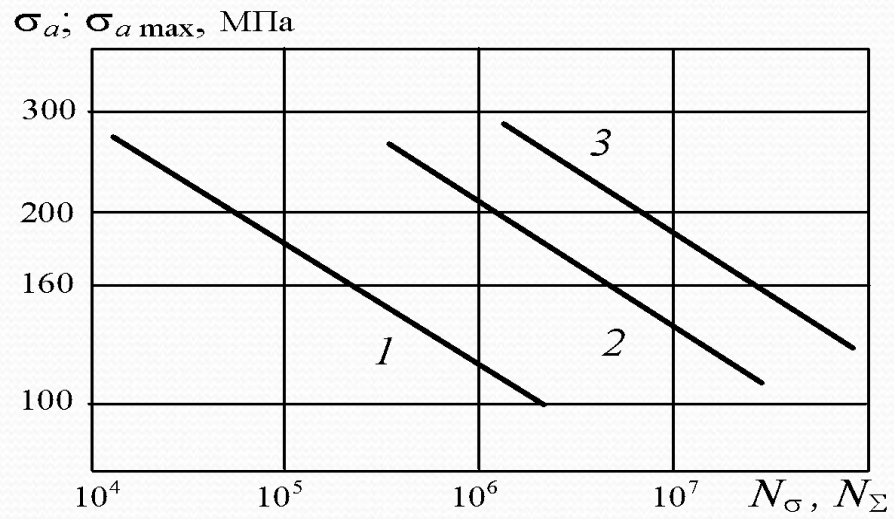
1 (при регулярном нагружении) и  
2 (при блочном нагружении)  
усталости для среднеуглеродистой стали



# СЛУЧАЙНЫЙ ПРОЦЕСС НАГРУЖЕНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ



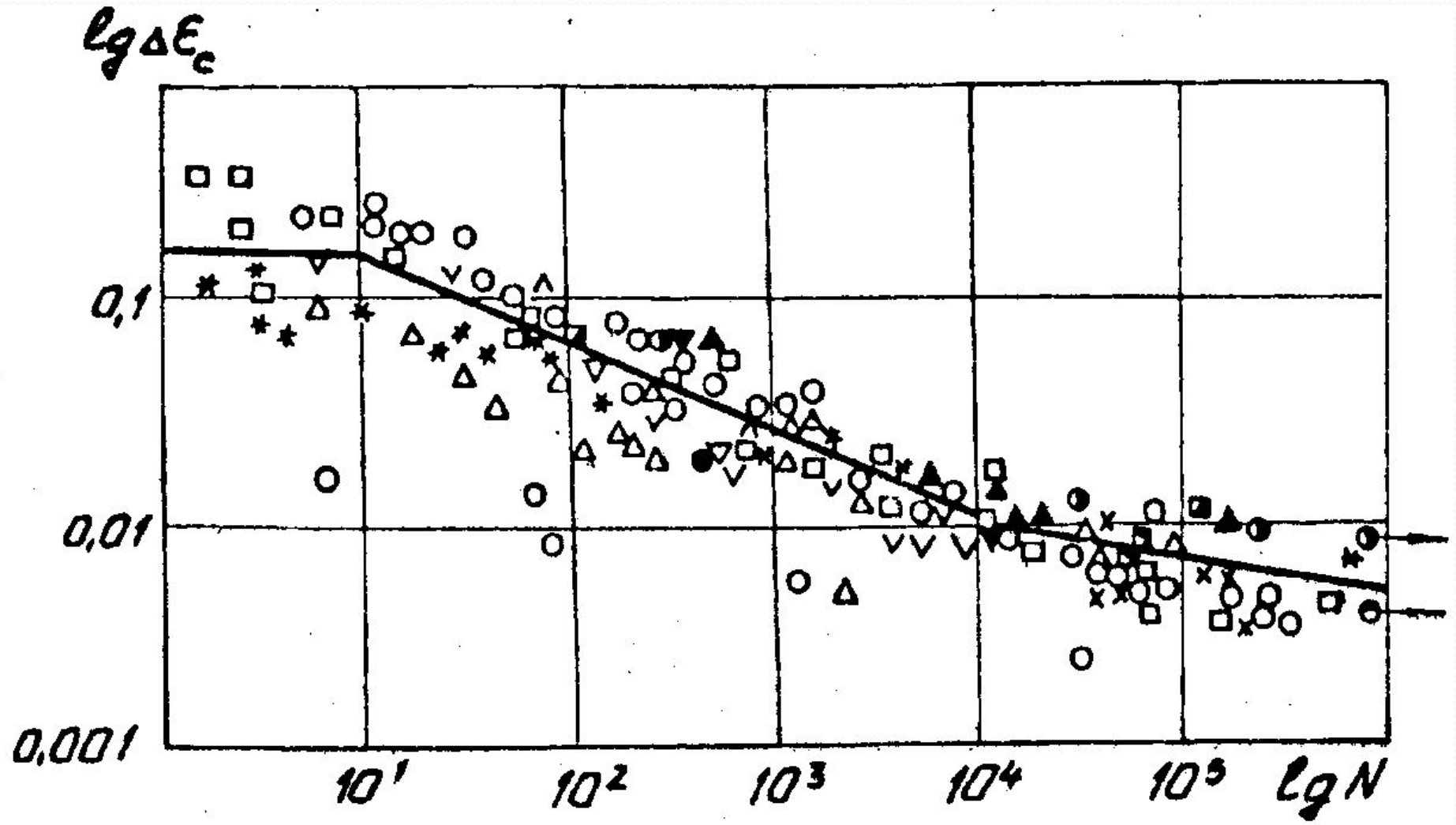
Случайный процесс нагруженности  $\sigma(t)$  и его схематизация в ограниченном интервале времени  $\Delta t$  законом распределения  $\phi(\sigma)$  действующих напряжений  $\sigma$  либо блоком нагружения  $w(\sigma)$



Первичная кривая усталости  $1$  при регулярном нагружении ( $F1$ ) и вторичные кривые усталости  $2$  и  $3$  соответственно при узкополосном ( $F2$ ) и широкополосном ( $F3$ ) случайных процессах нагружения



# 29.6 УСТАЛОСТЬ ПРИ ЖЕСТКОМ НАГРУЖЕНИИ



Кривая усталости построенная при жестком нагружении