

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

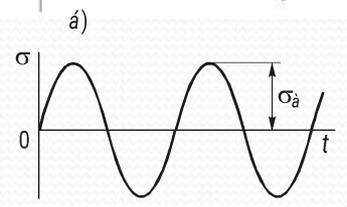
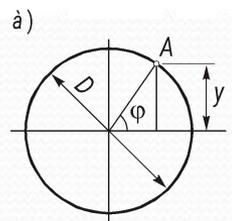
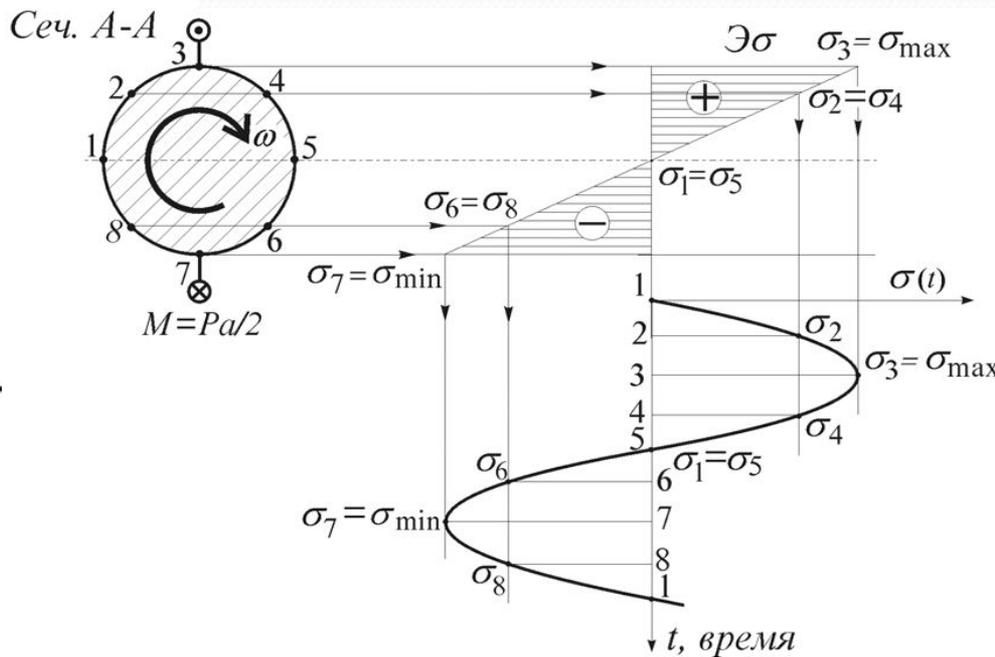
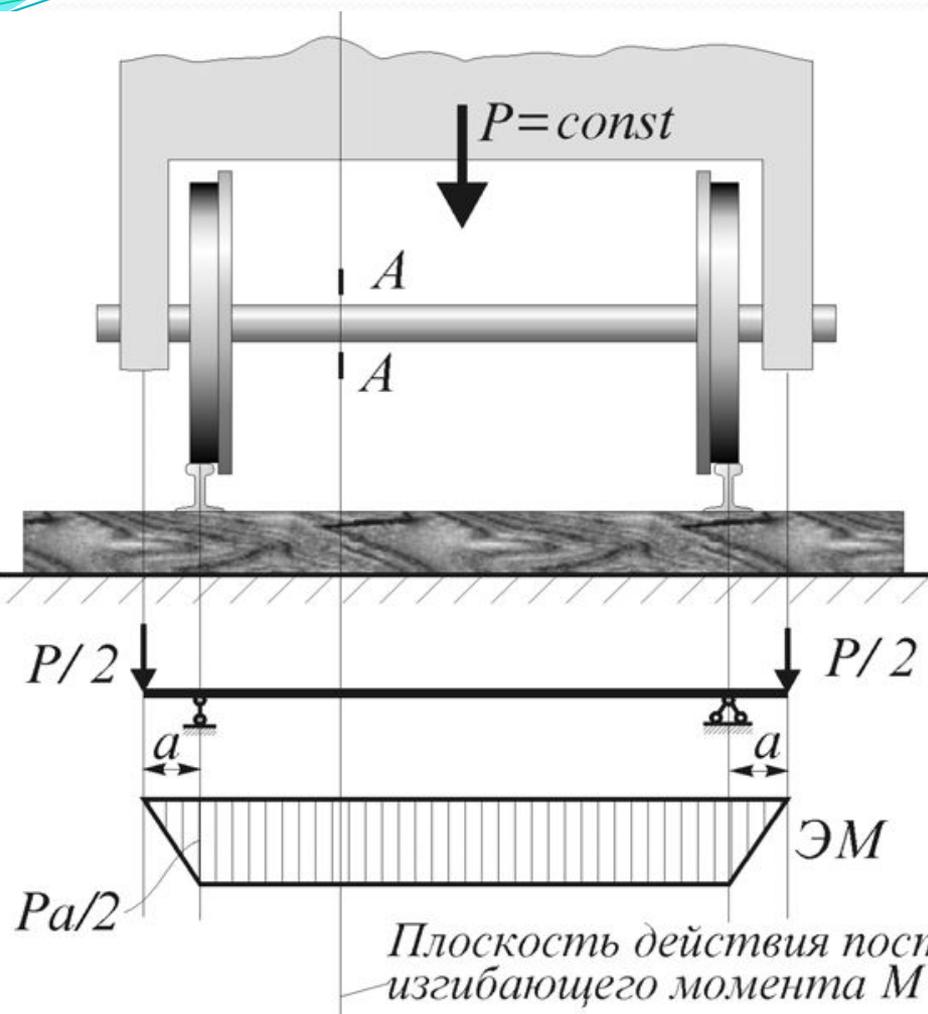
(по всем вопросам обращаться на кафедру ауд. 1403, 1415а)

ГОМЕЛЬ, 2015



Лекция 29
ПРОЧНОСТЬ ПРИ
ЦИКЛИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЯВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

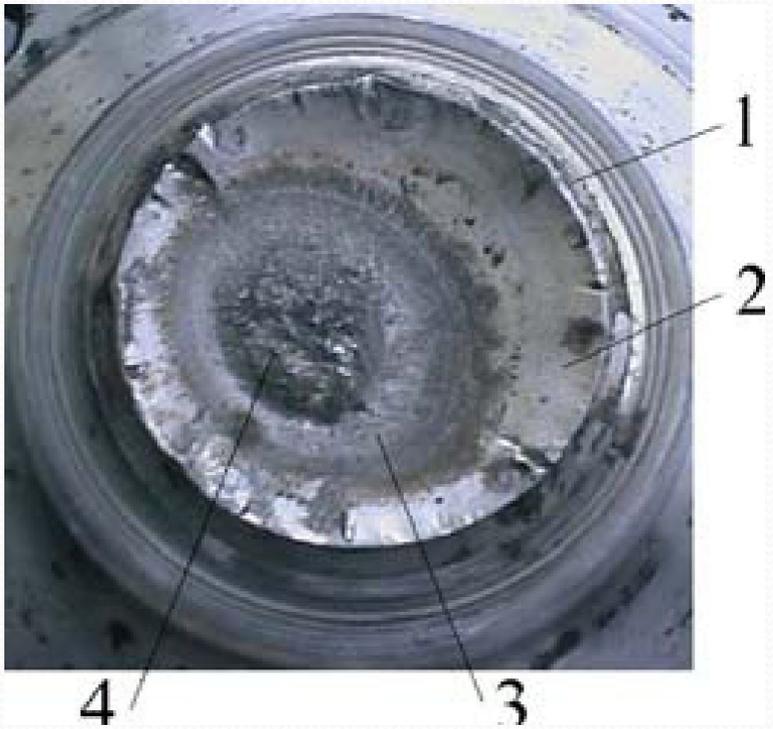


$$y = \frac{D}{2} \sin(\omega t);$$

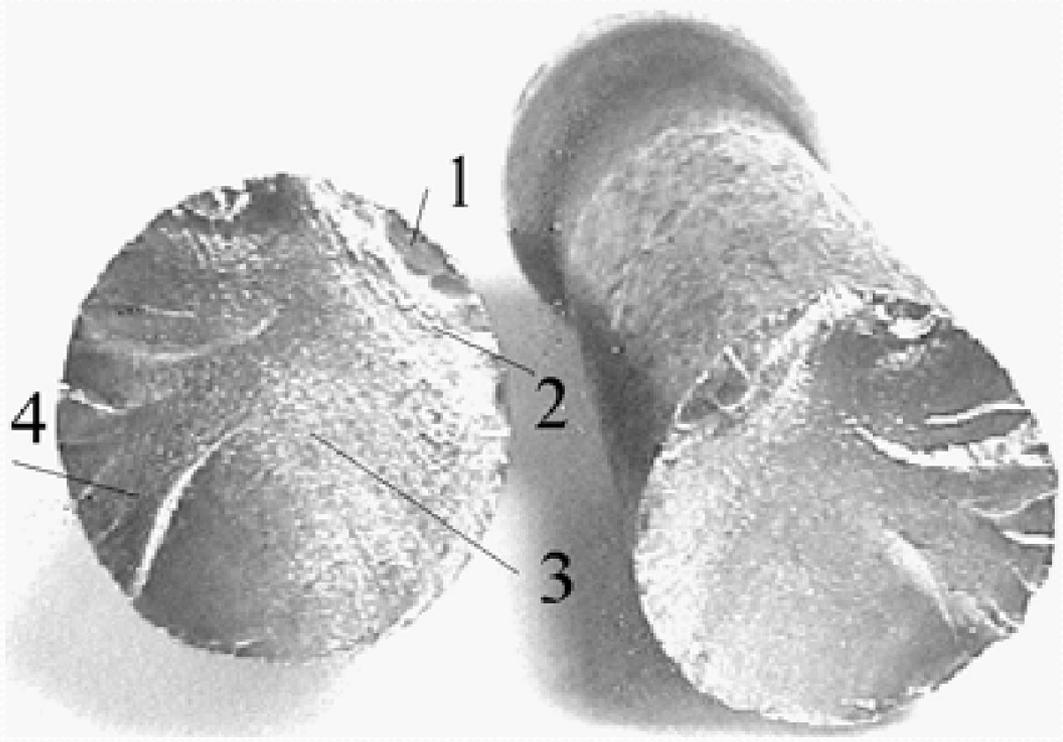
$$\sigma(t) = \frac{FaD}{2J_x} \sin(\omega t)$$



29.3 УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. ЯВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ



Вал ведущего колеса
автомобиля



Долото перфоратора



29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.

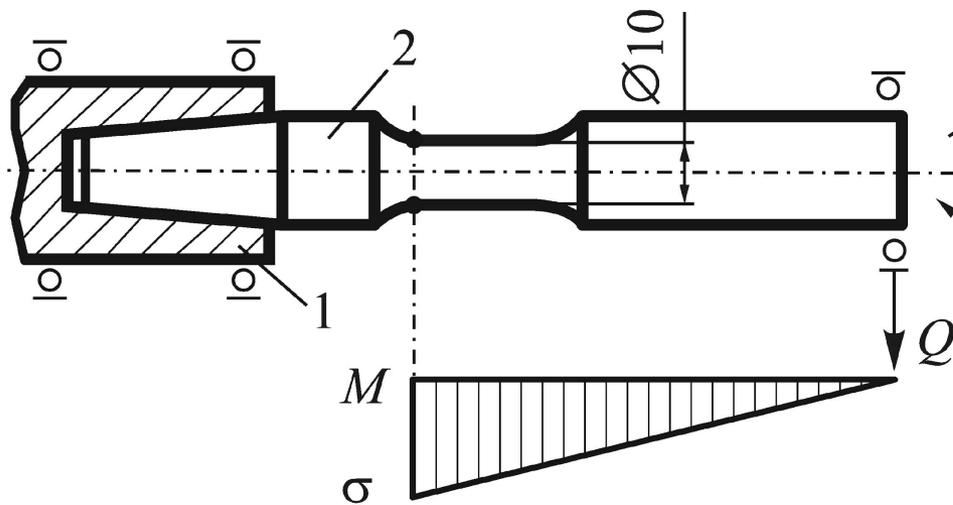
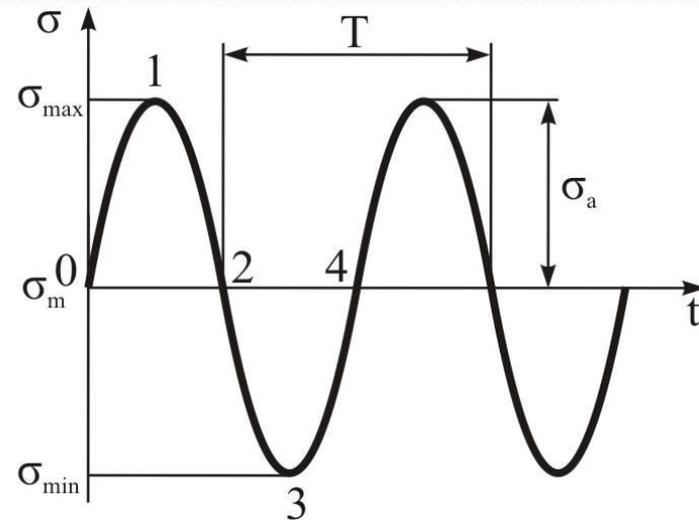
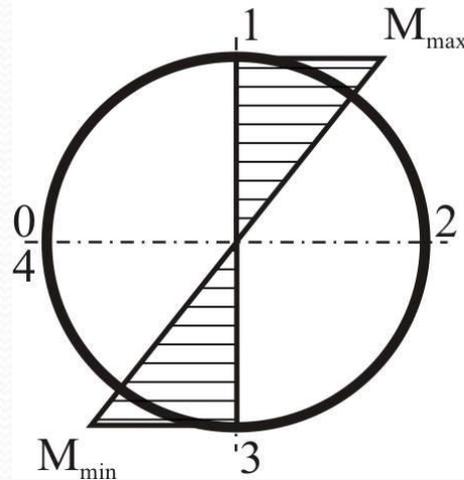


Схема испытаний стального образца на механическую усталость: 1 - образец; 2 - шпиндель испытательной машины

Цикл напряжений при испытаниях на механическую усталость





29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.



Коэффициент асимметрии цикла

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

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, м³;

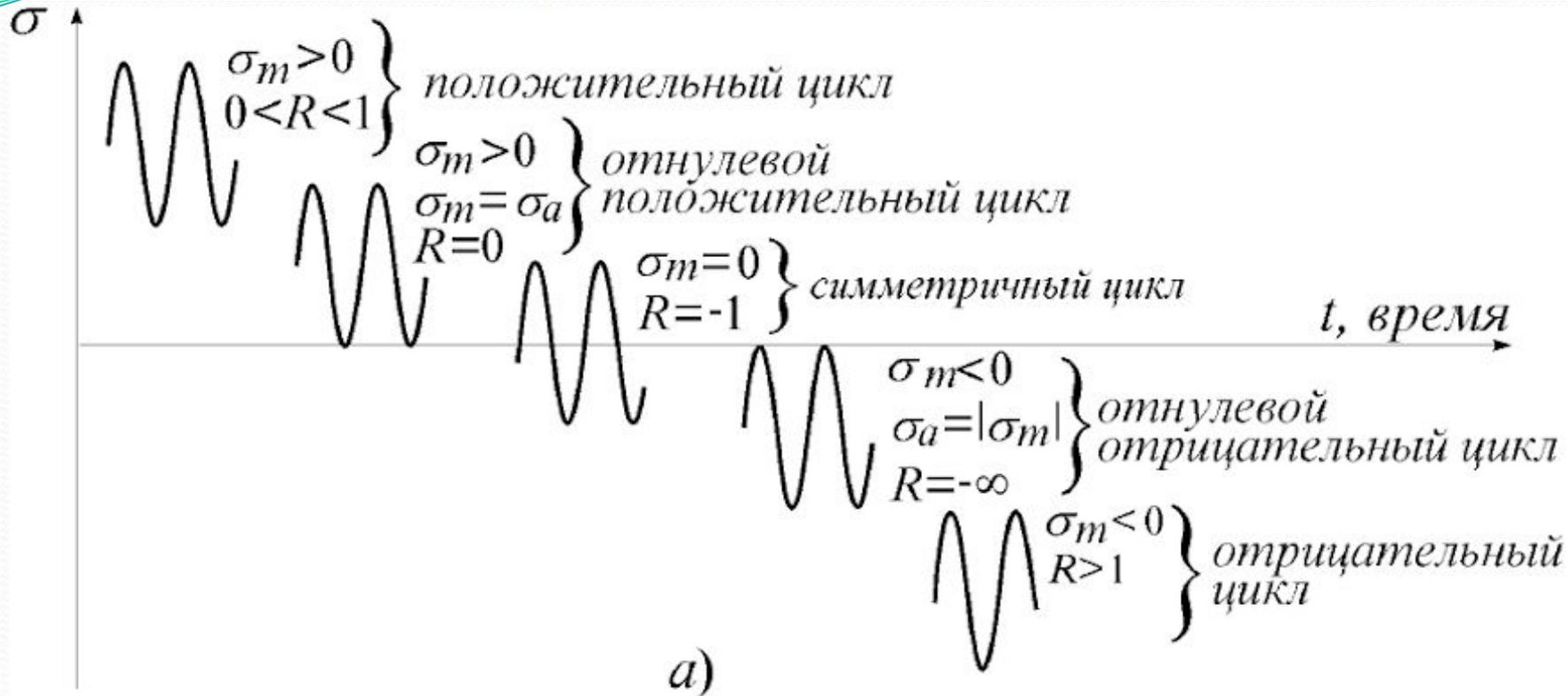
Q – изгибающая нагрузка, Н;

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

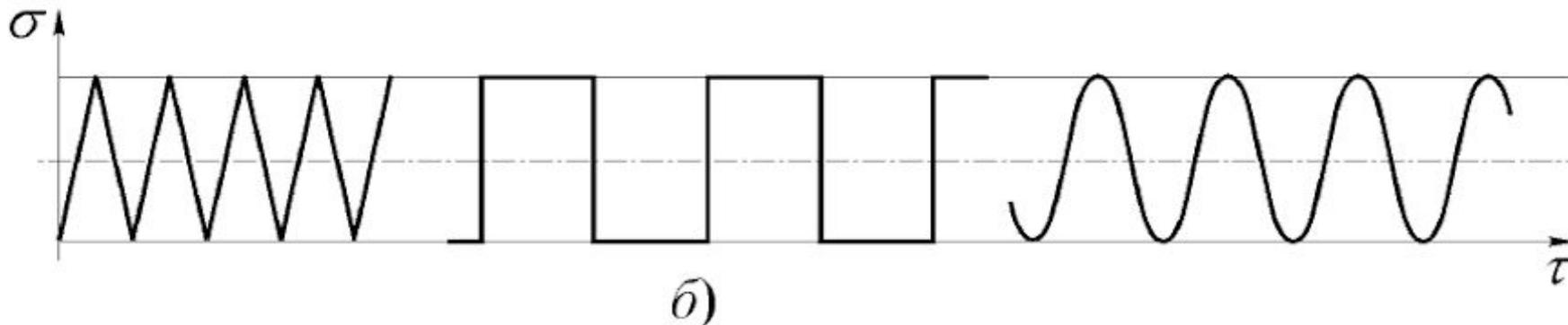
d – диаметр рабочей части образца.



29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.



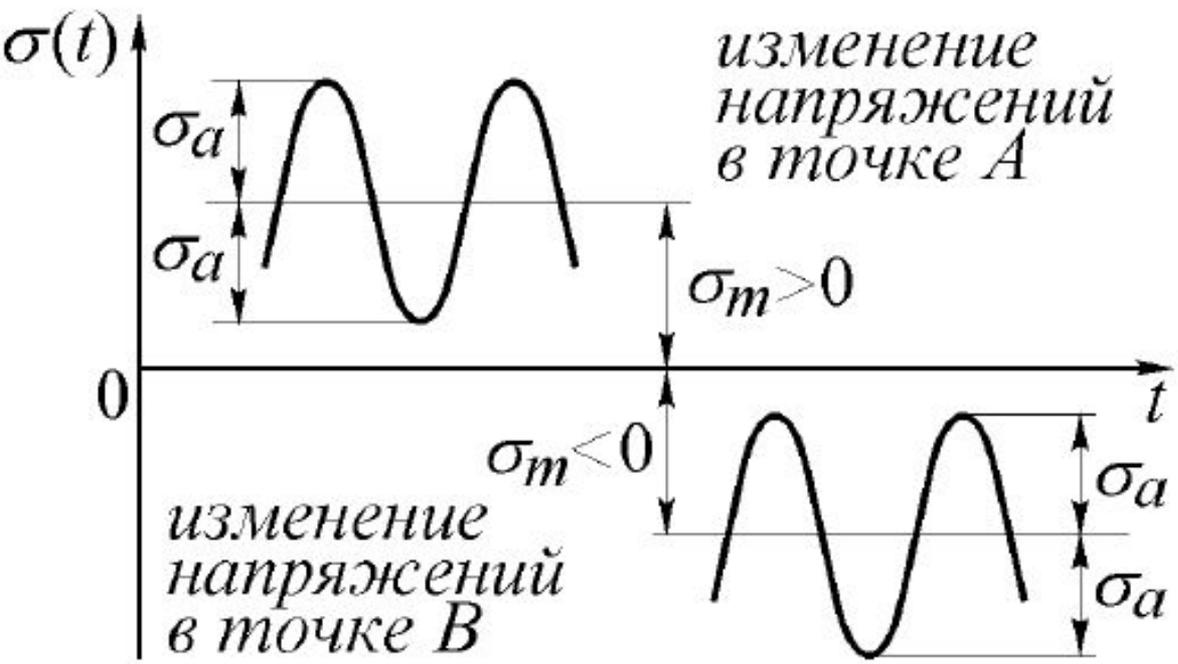
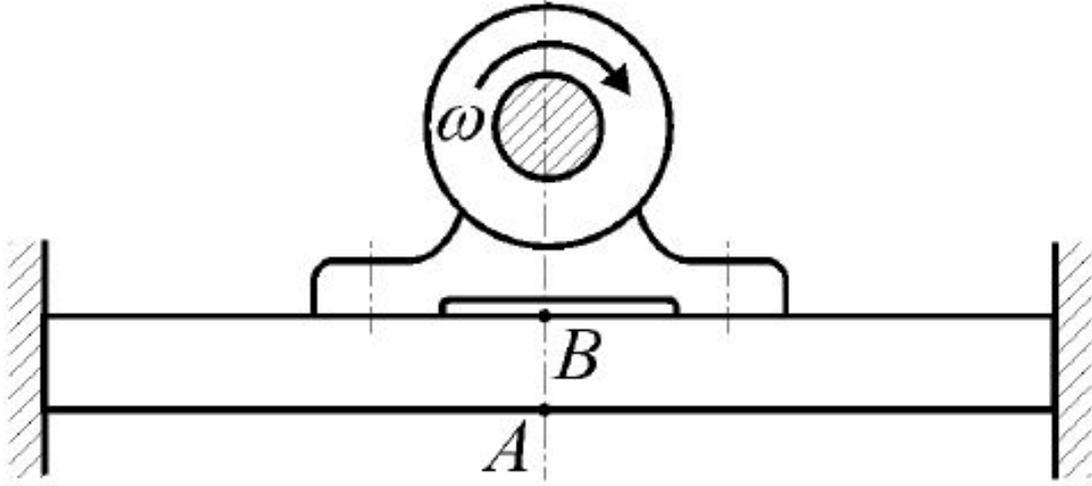
a)



б)



29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКА НАПРЯЖЕНИЙ.



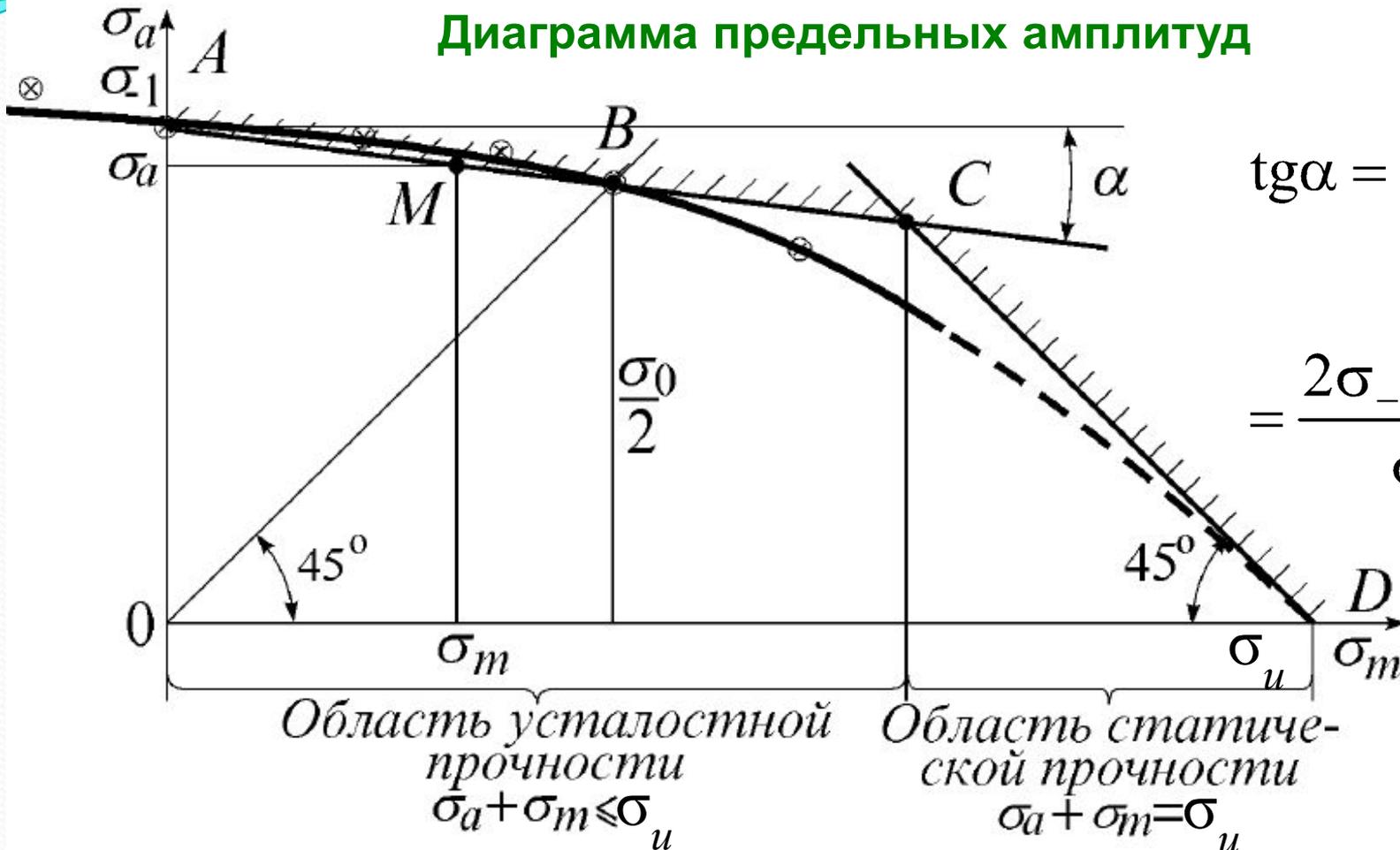
Циклы напряжений в реальных деталях машин



29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.



Диаграмма предельных амплитуд



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

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

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

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

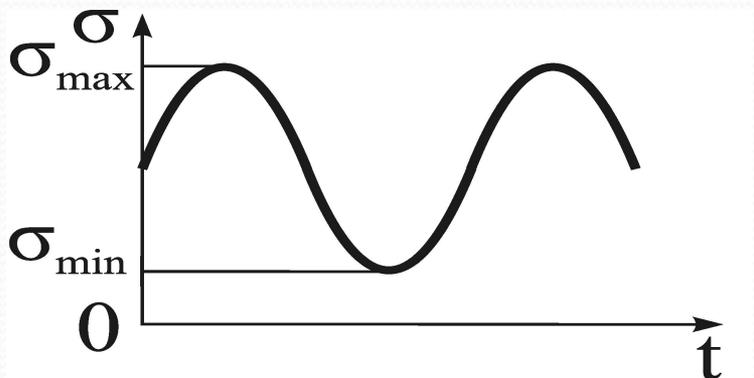
формула Гафа-Полларда



29.1 ПОВТОРНО-ПЕРЕМЕННОЕ НАГРУЖЕНИЕ. ЦИКЛ НАПРЯЖЕНИЙ.



Приведение асимметричного цикла к симметричному

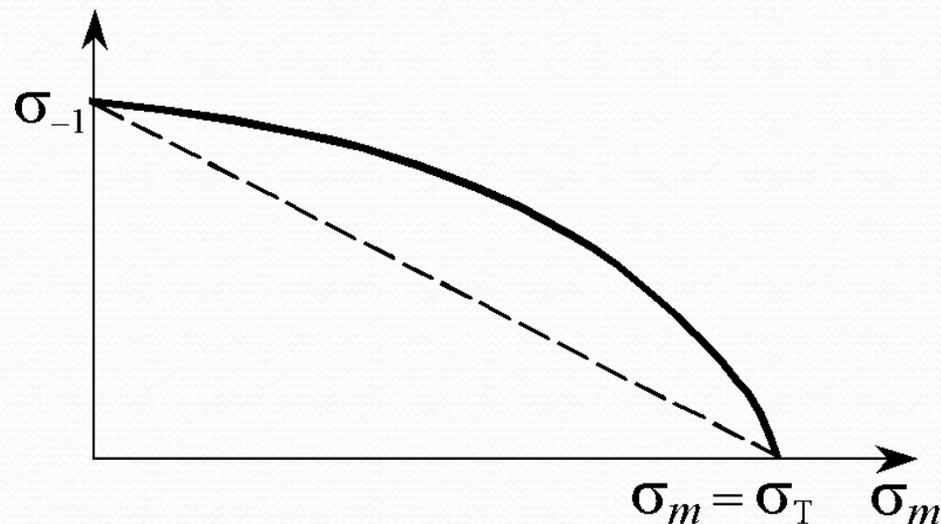


Несимметричный цикл

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

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

$$\lim \sigma_a = \sigma_R$$



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



29.2 КРИВАЯ УСТАЛОСТИ И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.

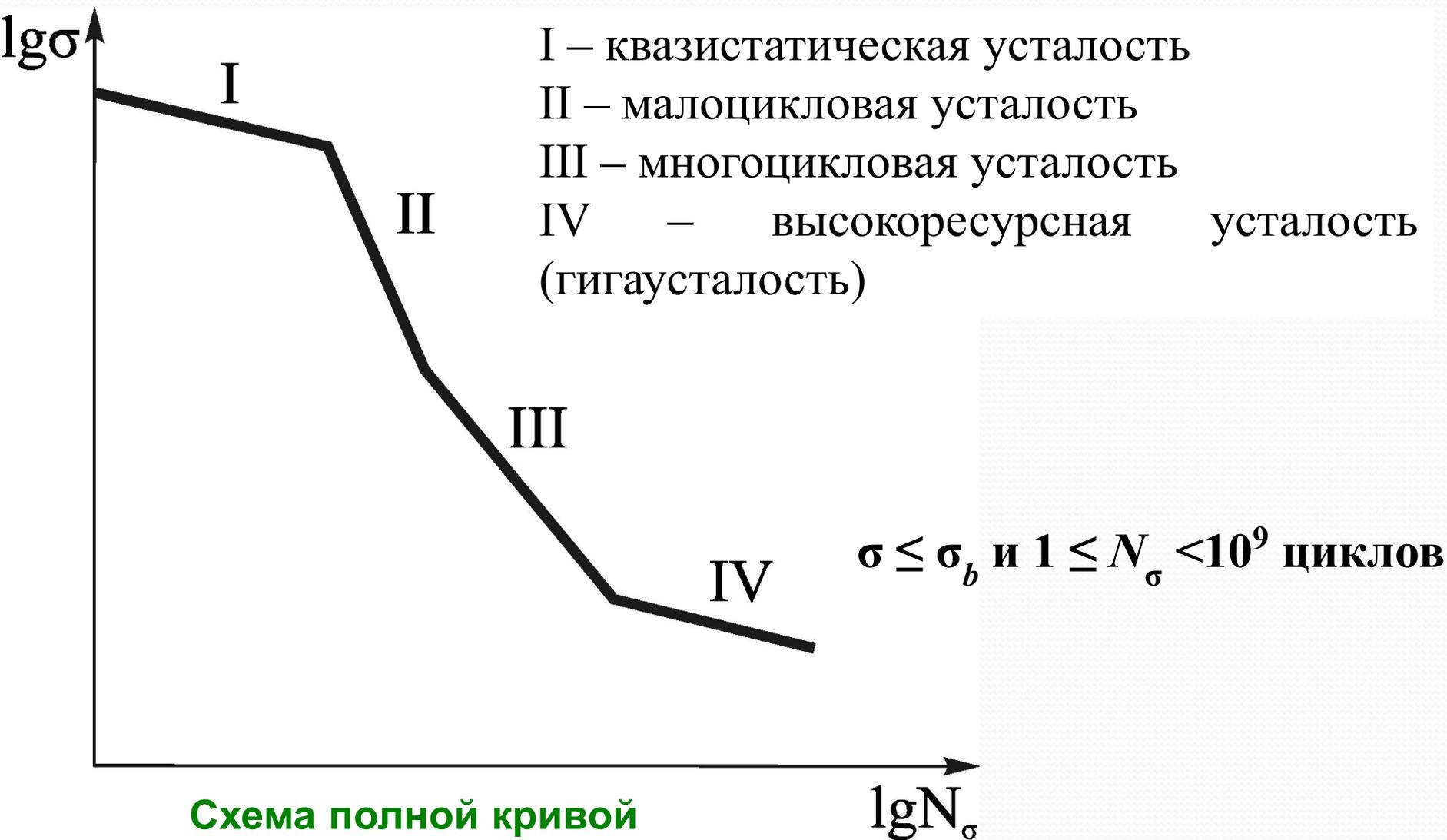


Схема полной кривой механической усталости



ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ (МНОГОЦИКЛОВОЙ) УСТАЛОСТИ

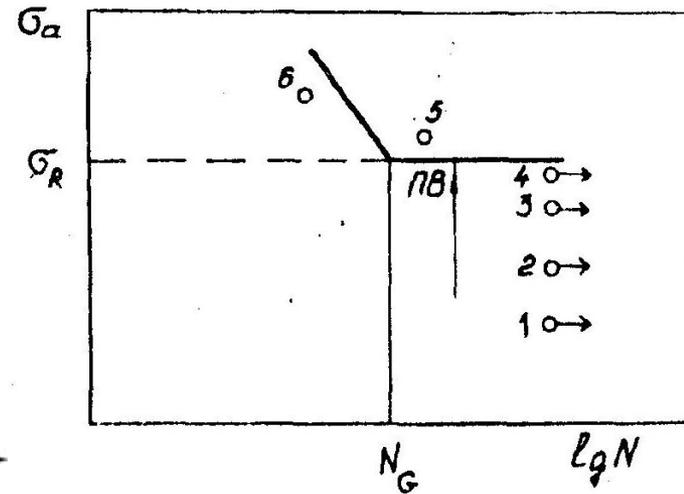
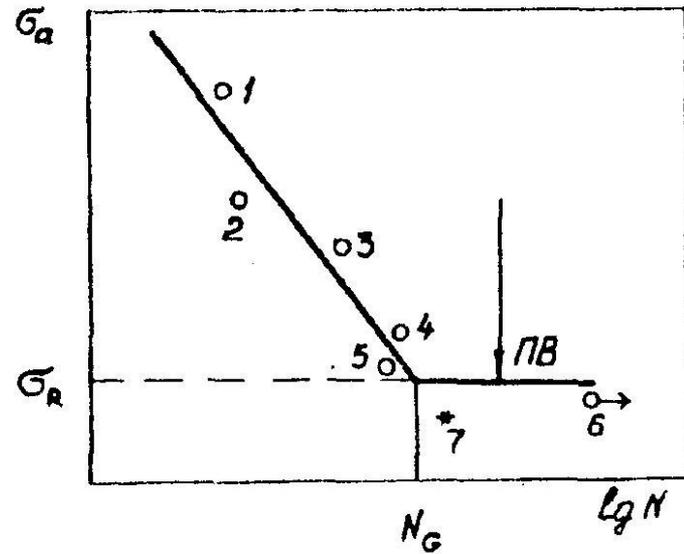
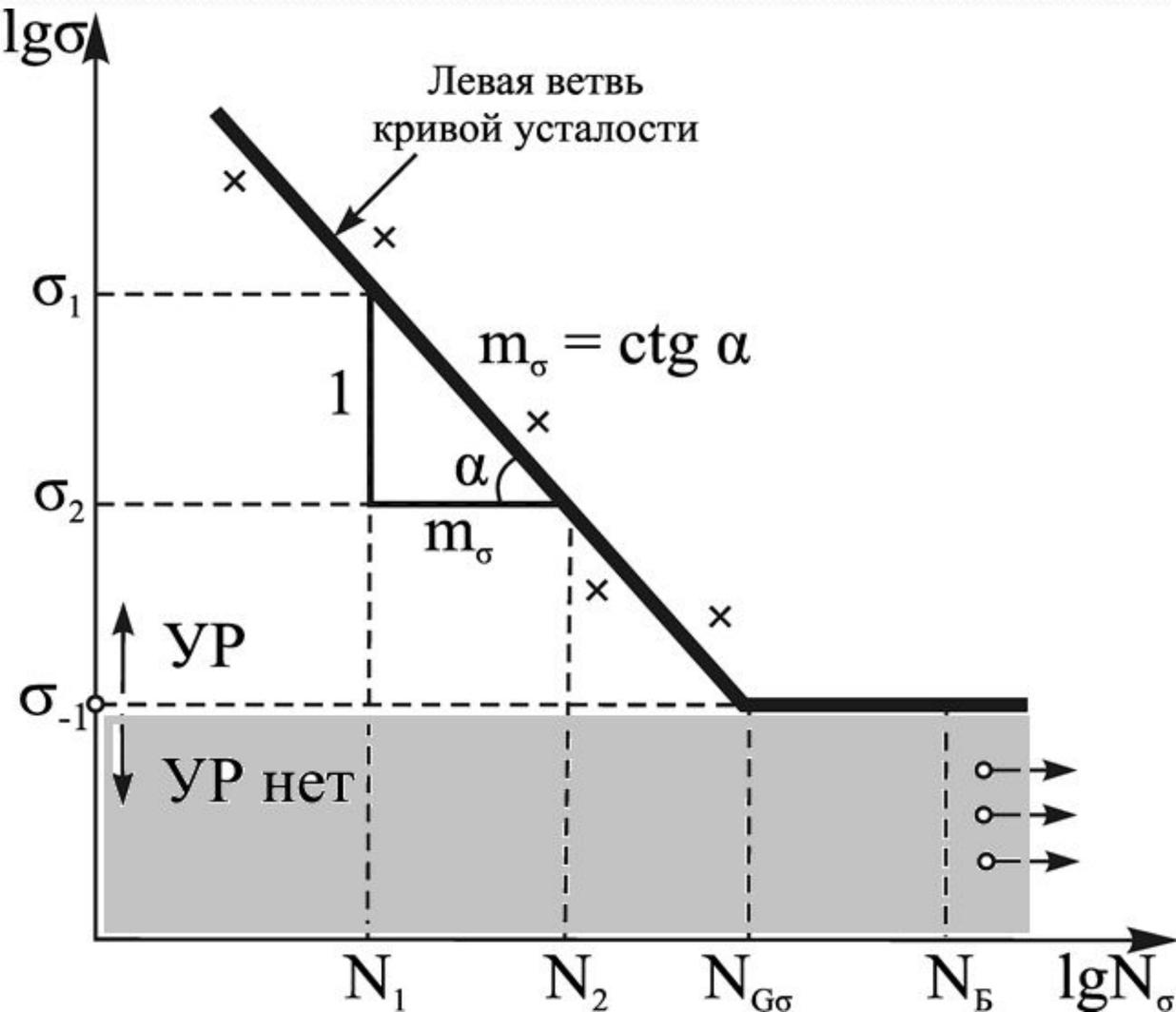


Схема кривой механической усталости в многоцикловой области (S-N-кривая, кривая Вёлера)



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_σ константа сопротивления усталости.

Показатель наклона кривой механической усталости

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

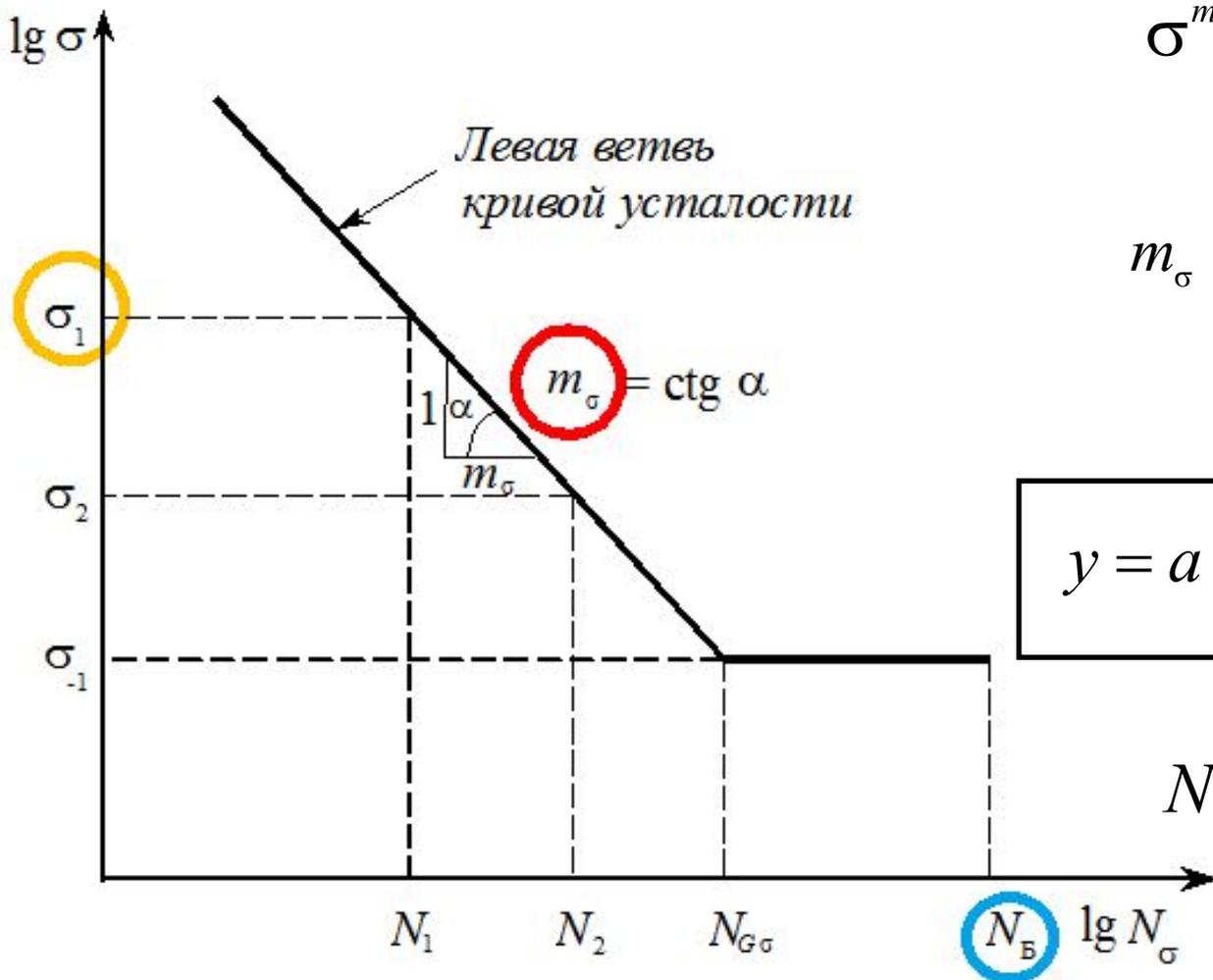
$$\begin{array}{l} \sigma_1 \rightarrow \sigma; \sigma_2 \rightarrow \sigma_{-1} \\ N_1 \rightarrow N; N_2 \rightarrow N_{G\sigma} \end{array} \quad \longrightarrow \quad m_\sigma = \frac{\lg N_{G\sigma} - \lg N}{\lg \sigma - \lg \sigma_{-1}}.$$

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

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



ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ (МНОГОЦИКЛОВОЙ) УСТАЛОСТИ



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

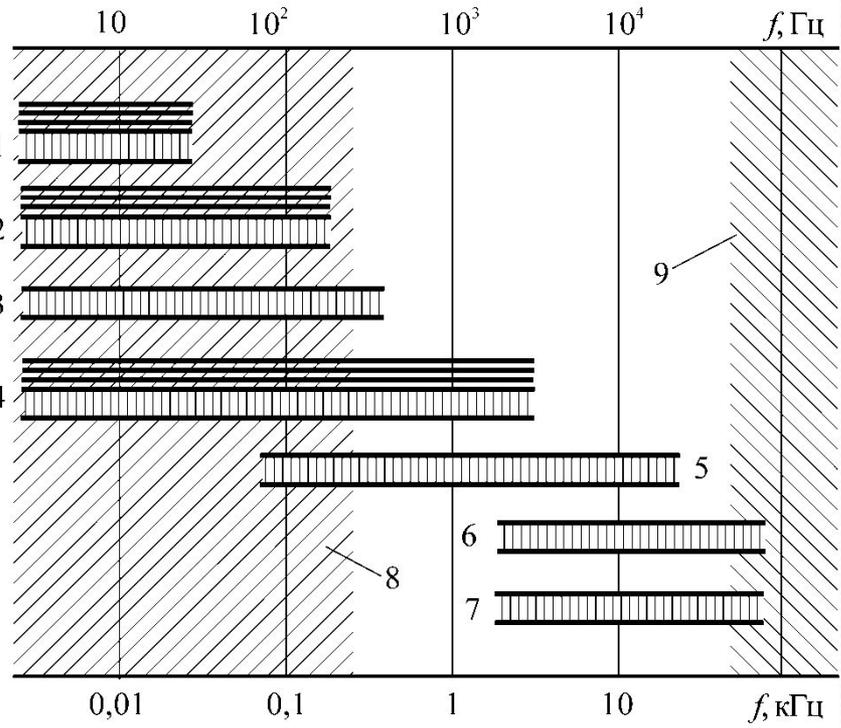
$$m_\sigma = \text{ctg } \alpha = \frac{\lg N_2 - \lg N_1}{\lg \sigma_1 - \lg \sigma_2}$$

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

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

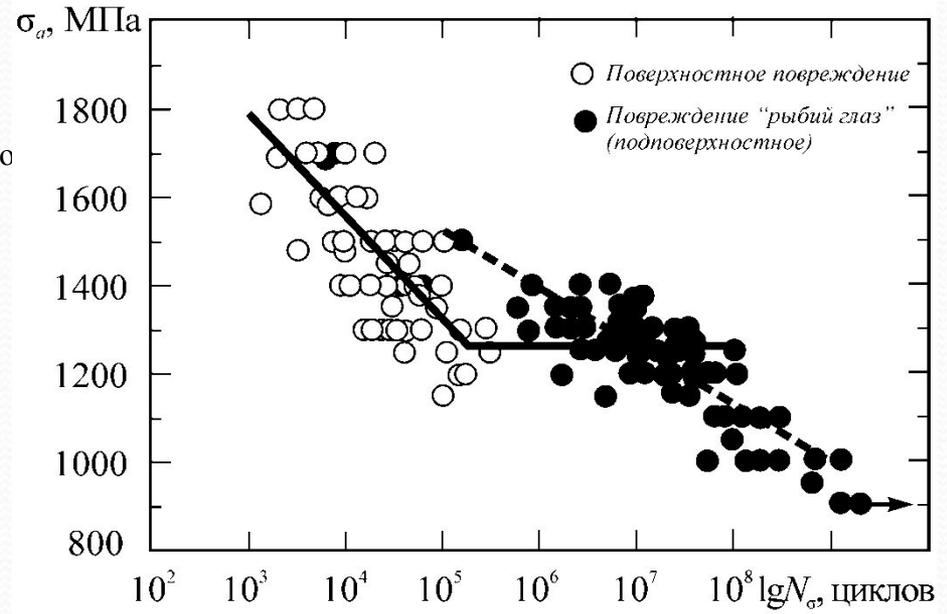
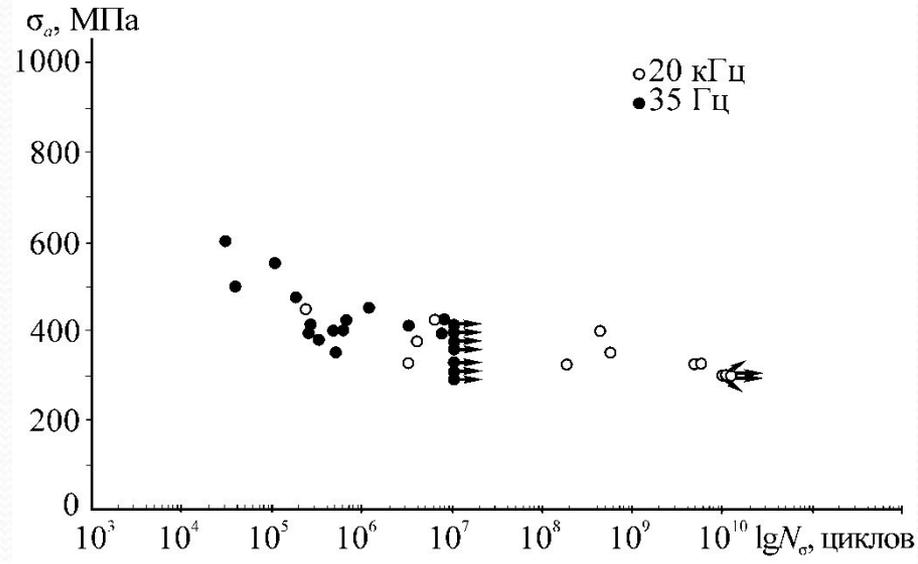


ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ (МНОГОЦИКЛОВОЙ) УСТАЛОСТИ



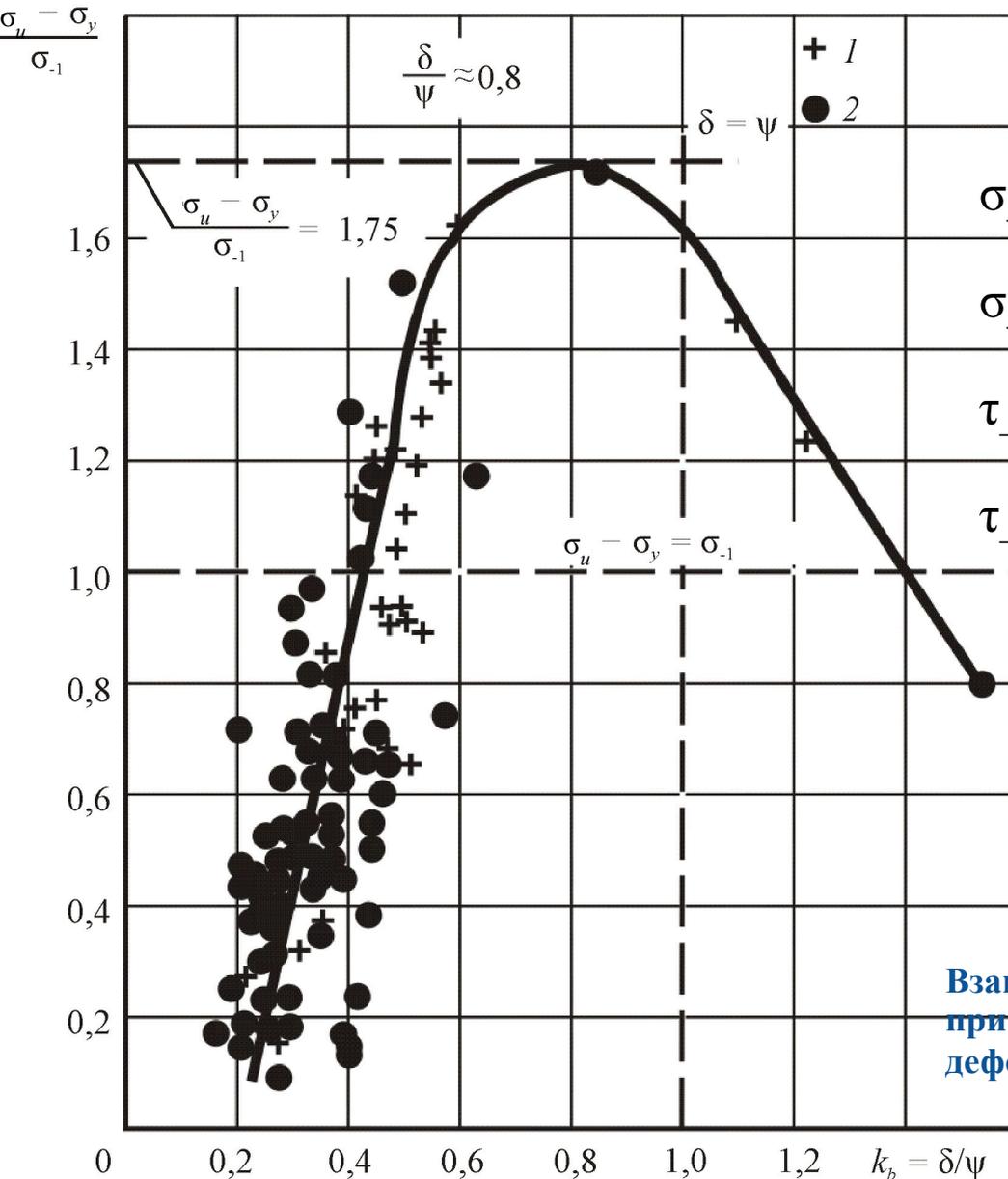
Способы возбуждения циклических нагрузок в зависимости от часто испытаний:

- 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



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

$$\sigma_{-1} = 1,65 \text{ НВ}$$

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

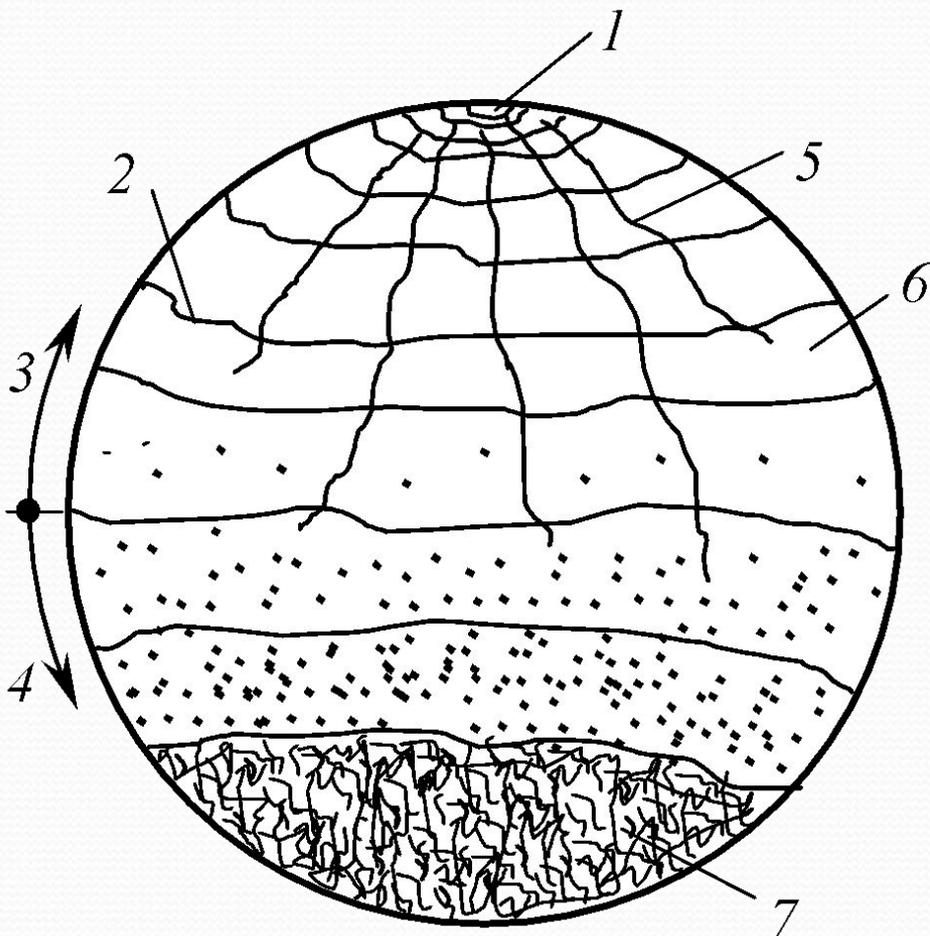
$$\tau_{-1} \approx 0,27 \sigma_u$$

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

Взаимосвязь свойств при статическом и циклическом деформировании

29.3 УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. МЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ.

17



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 неустойчивого роста, которая завершается мгновенным доломом (зона 7).



29.3 УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. МЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ.

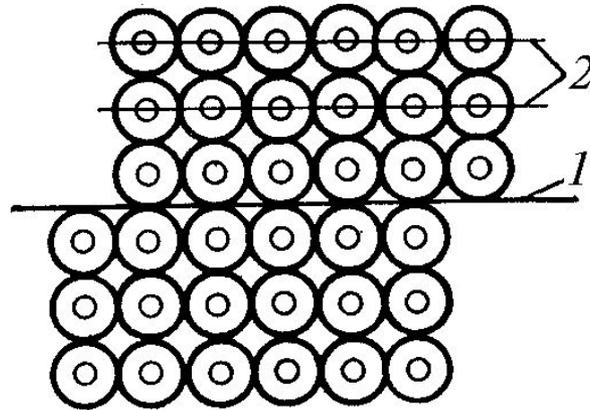
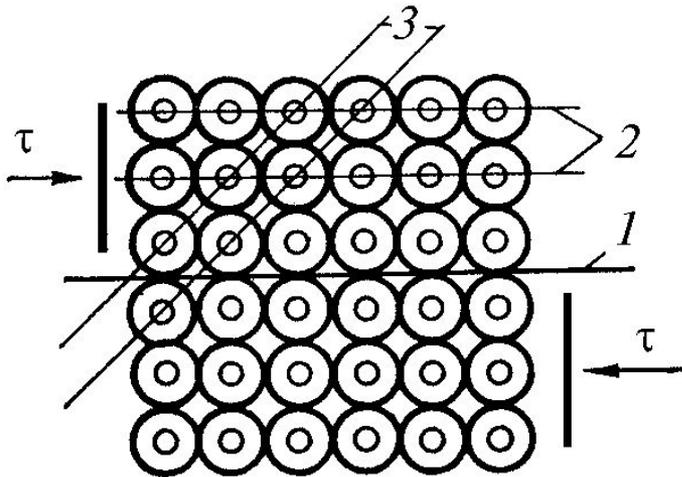
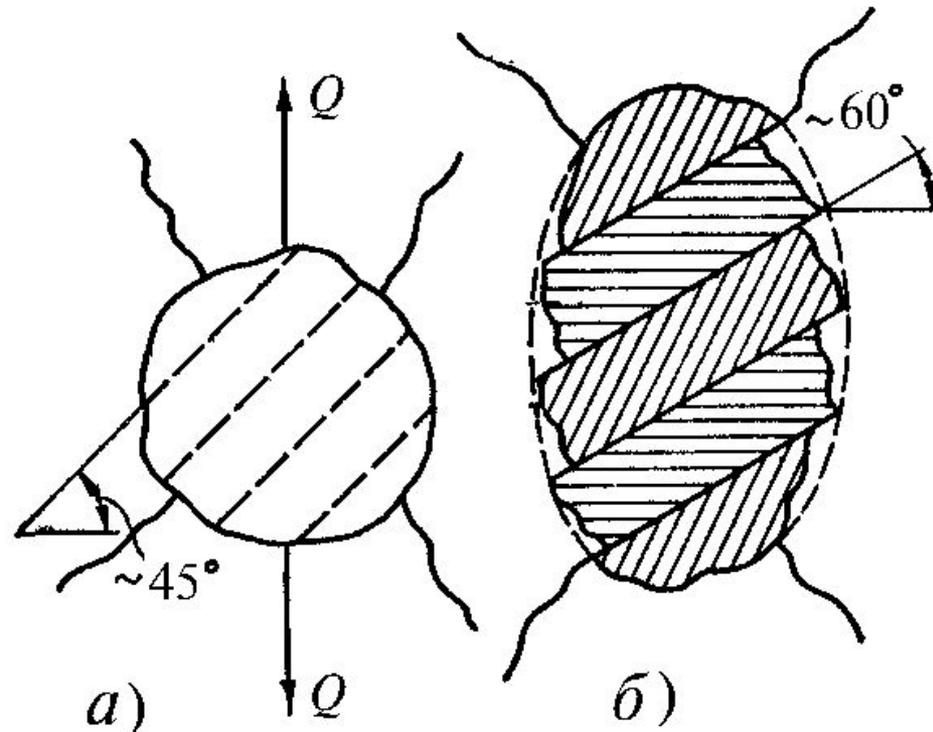


Схема смещения
скольжением

Схема смещения
двойникованием





29.3 УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ. МЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ.

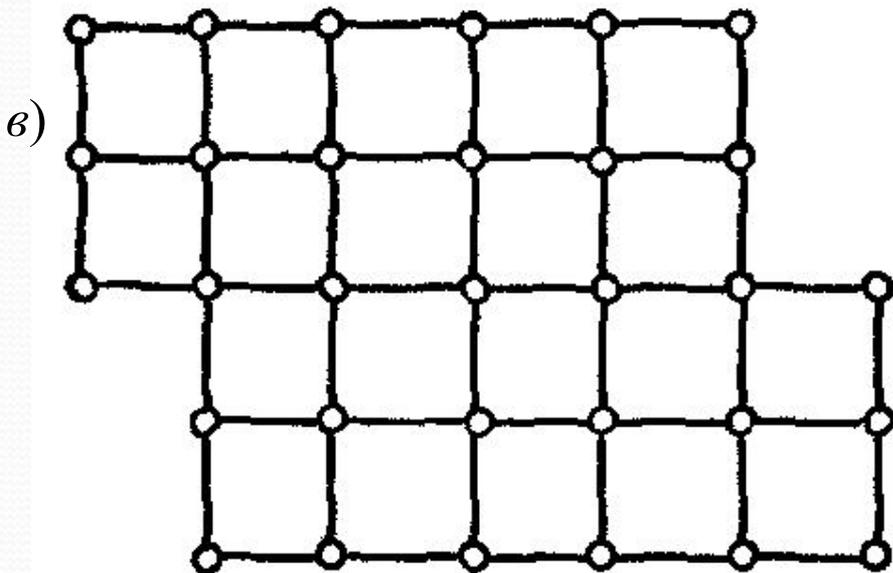
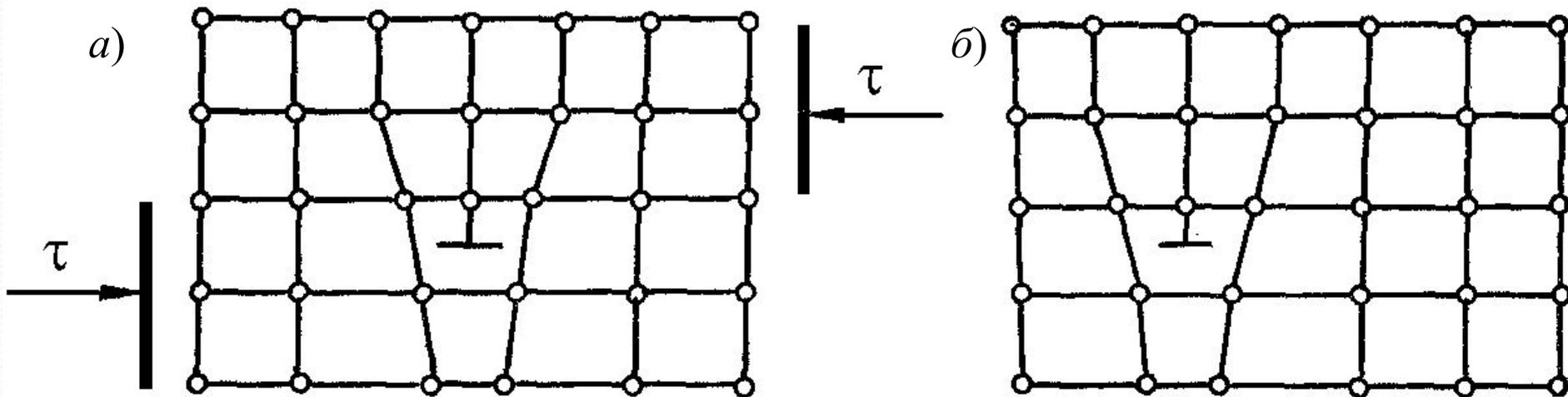
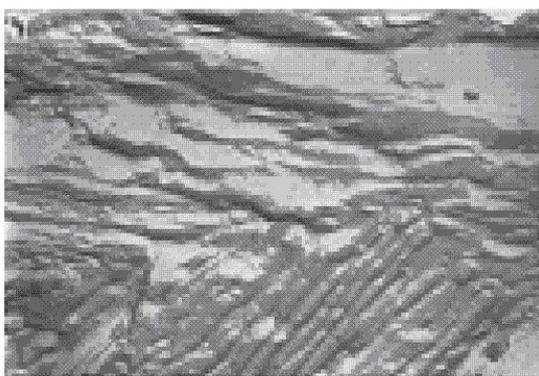
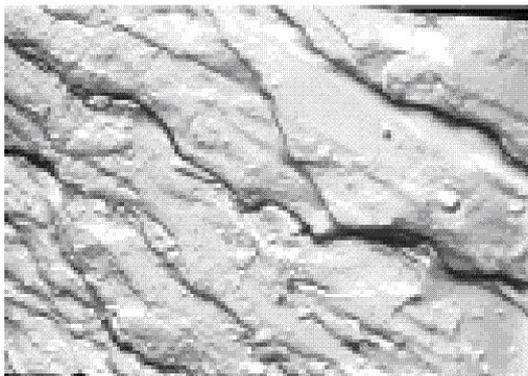
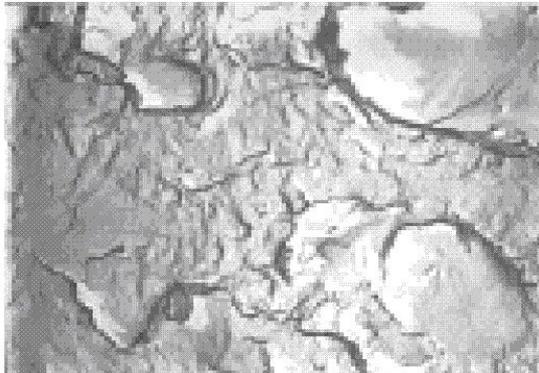
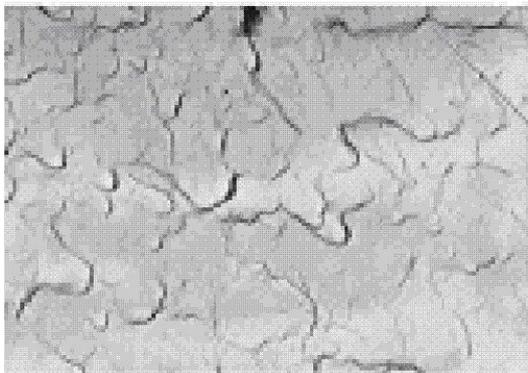
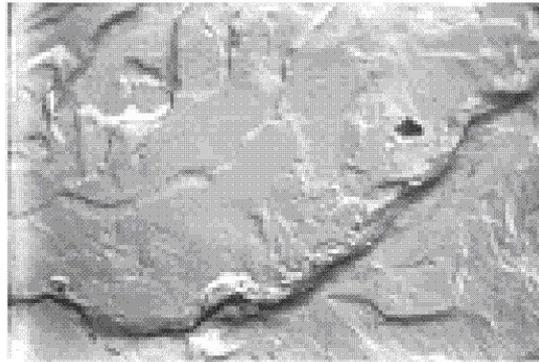
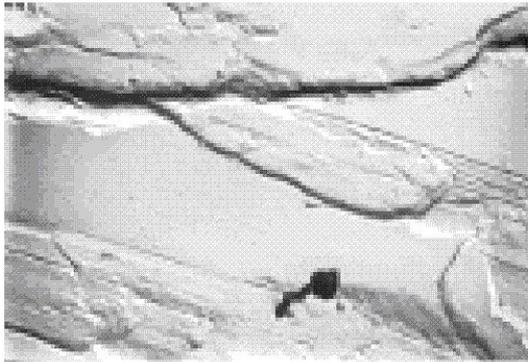


Схема перемещения
краевой дислокации



МИКРОМЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

20

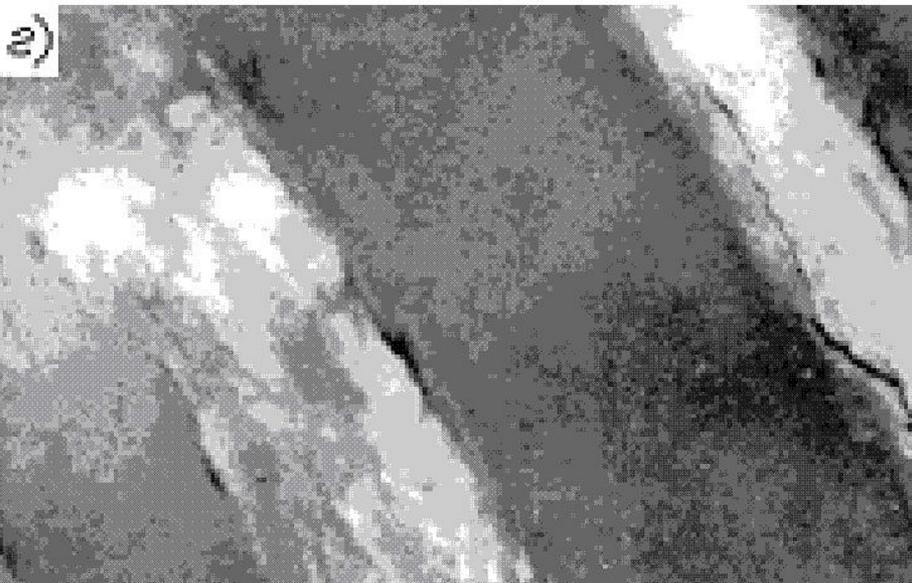
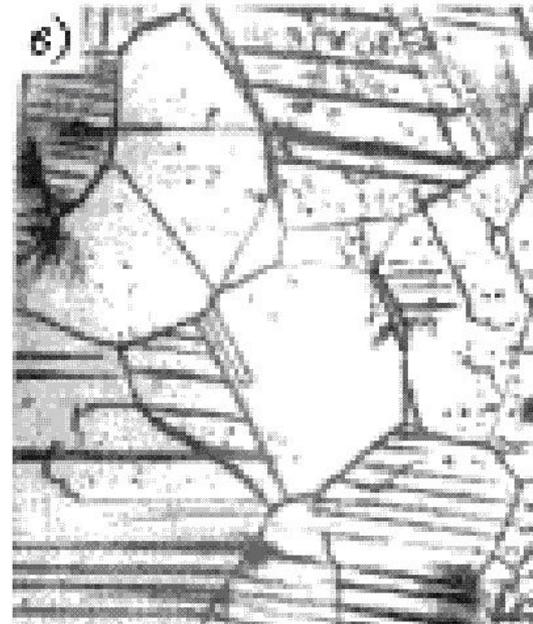
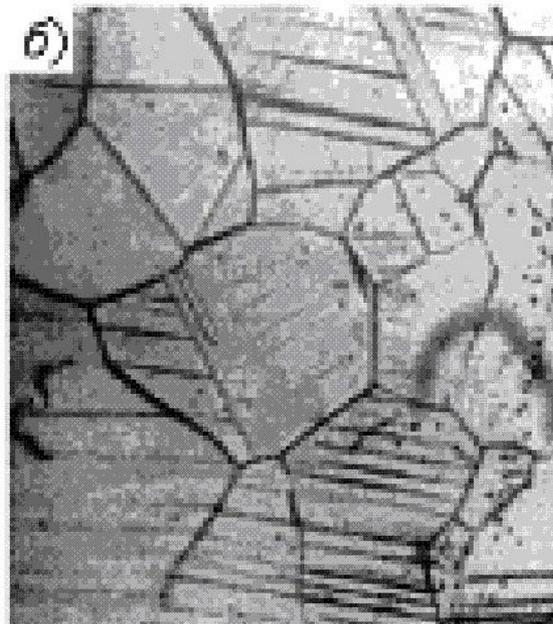
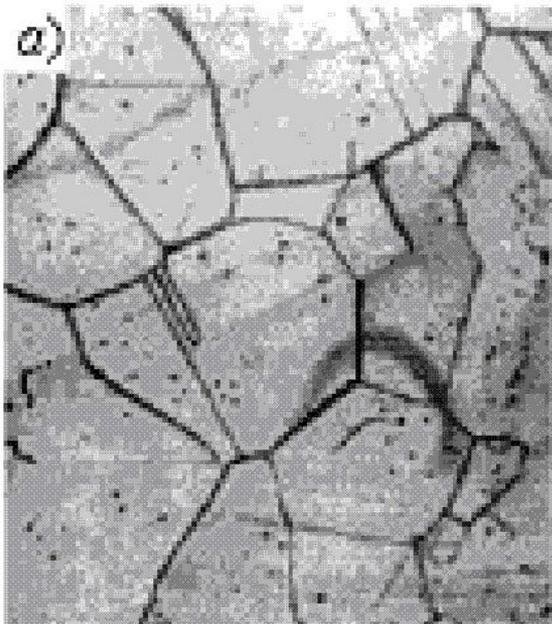


Характерные электронно-микроскопические фрактограммы поверхностей усталостного излома вала из стали 45 ($\times 2000$)



МИКРОМЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ.

21



Чистый никель на различных стадиях испытания на усталость:

a – $n = 10^4$ циклов;

б – $5 \cdot 10^4$ циклов;

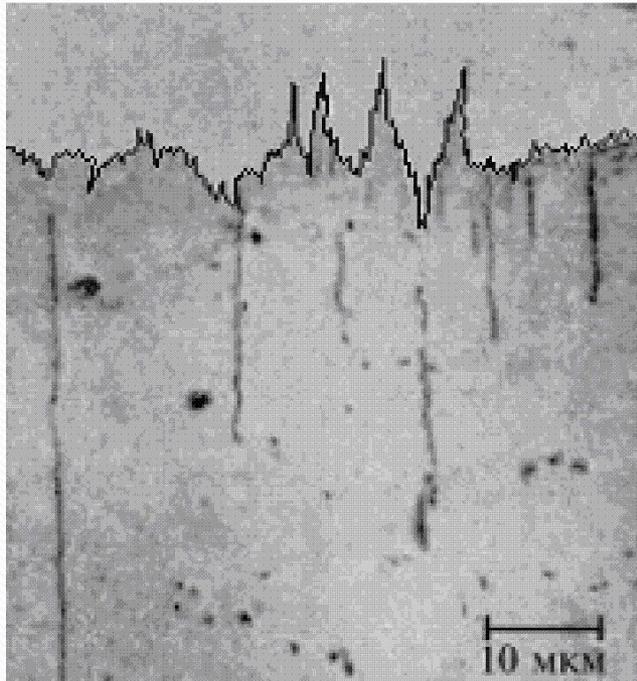
в – $n = 2,7 \cdot 10^5$ циклов ($\times 330$);

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

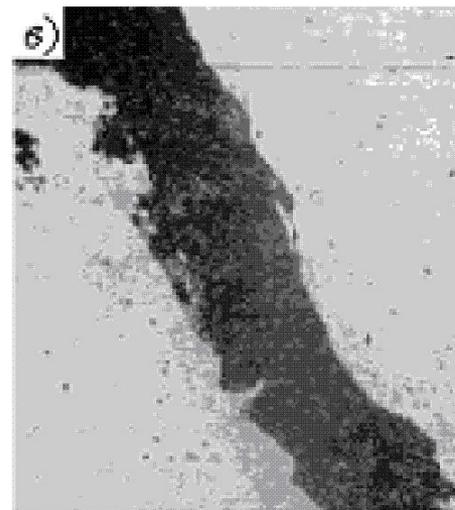
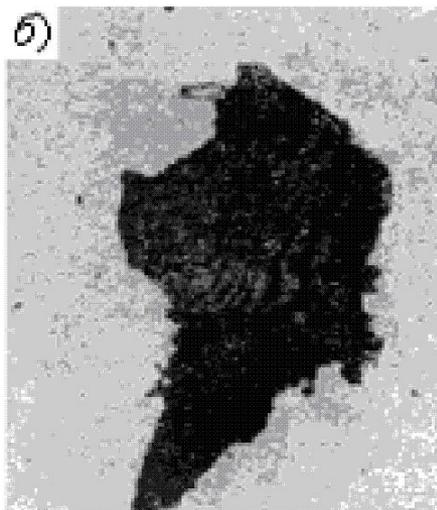
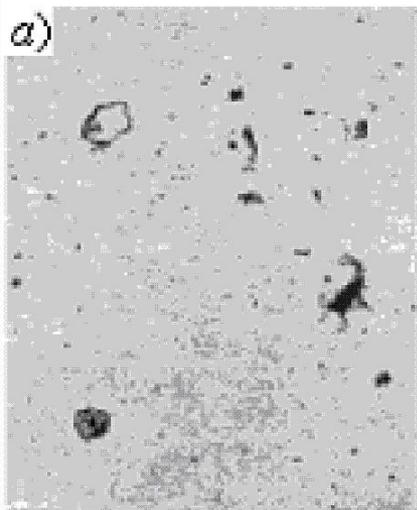


МИКРОМЕХАНИЗМЫ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

22



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



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

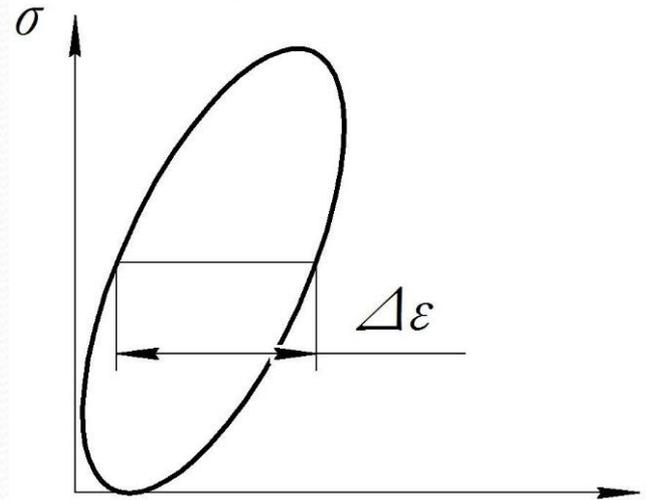
- a* – глобулы точечные и хлопьевидные,
- б* – округлые пластины,
- в* – вытянутые пластины



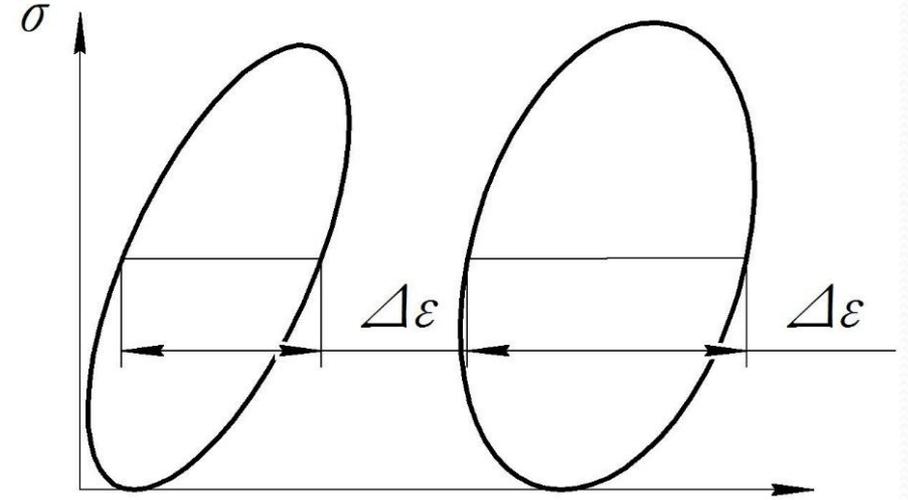
УСТАЛОСТЬ И НЕУПРУГОСТЬ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

$\Delta\varepsilon$ - ширина петли гистерезиса

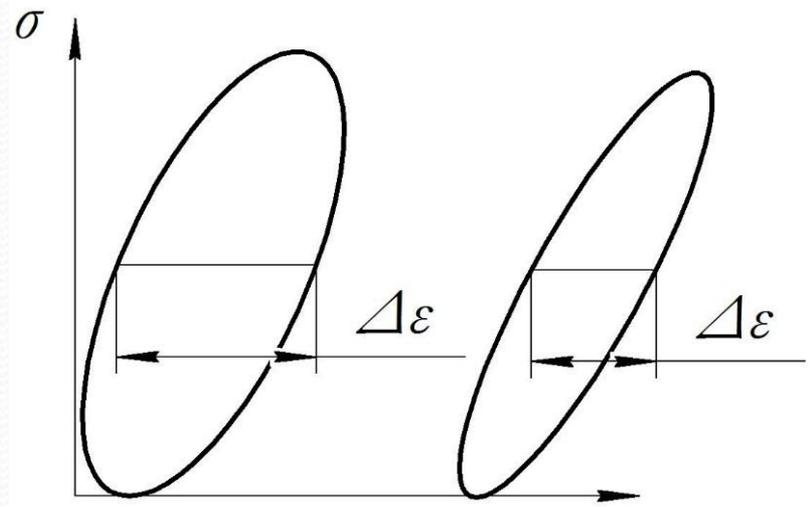
разупрочнение



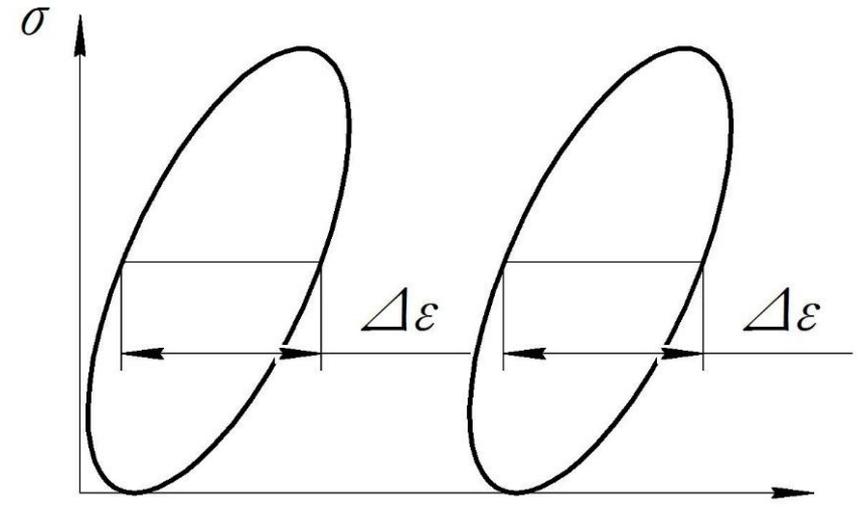
упрочнение ε



стабильное поведение ε



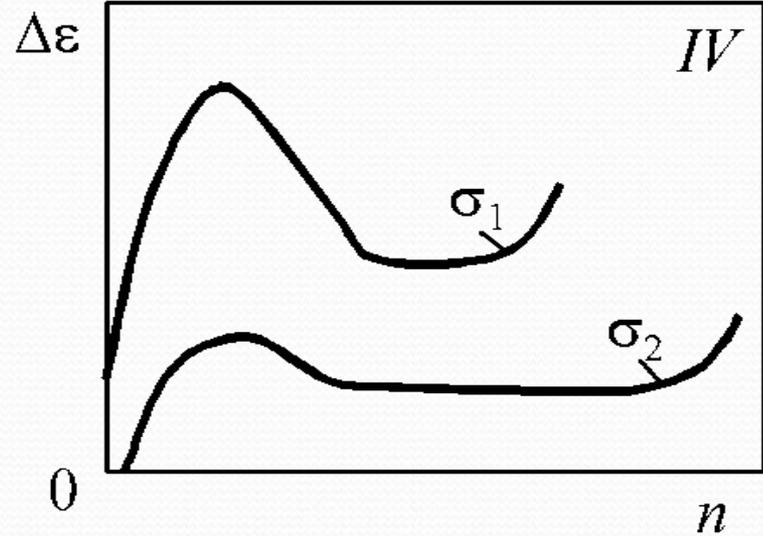
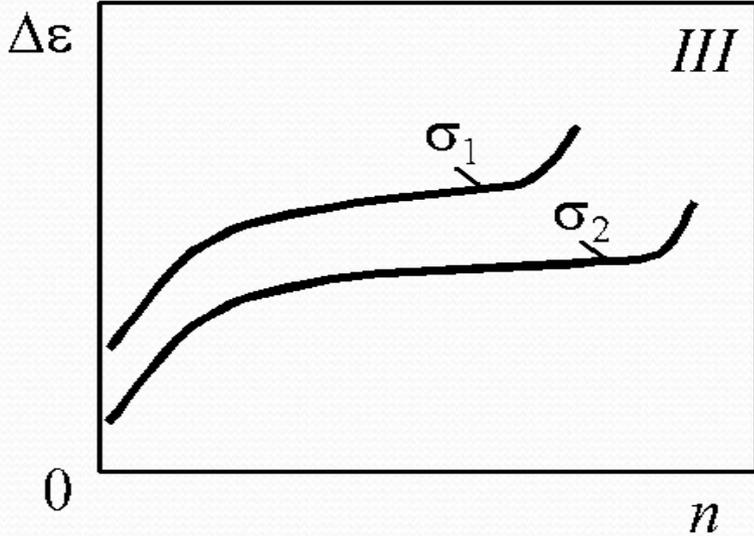
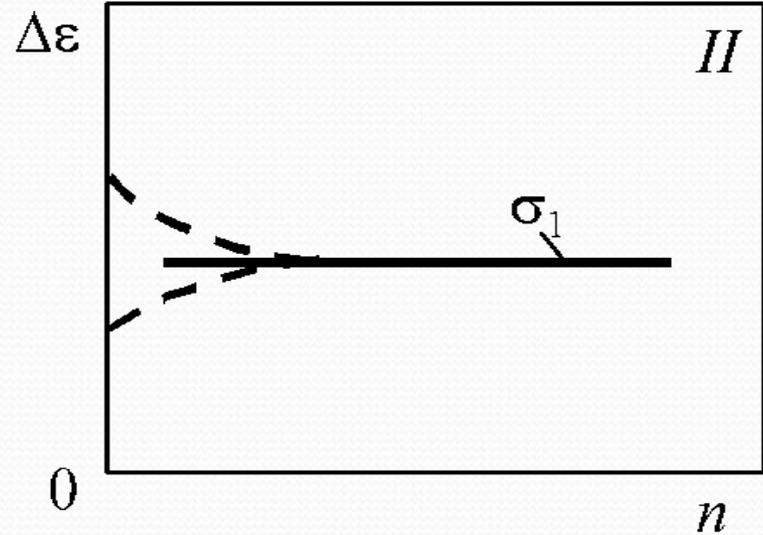
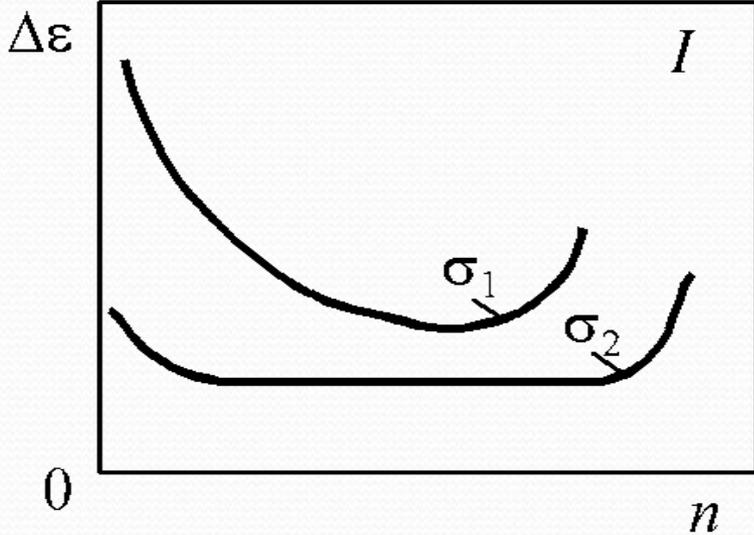
ε



ε



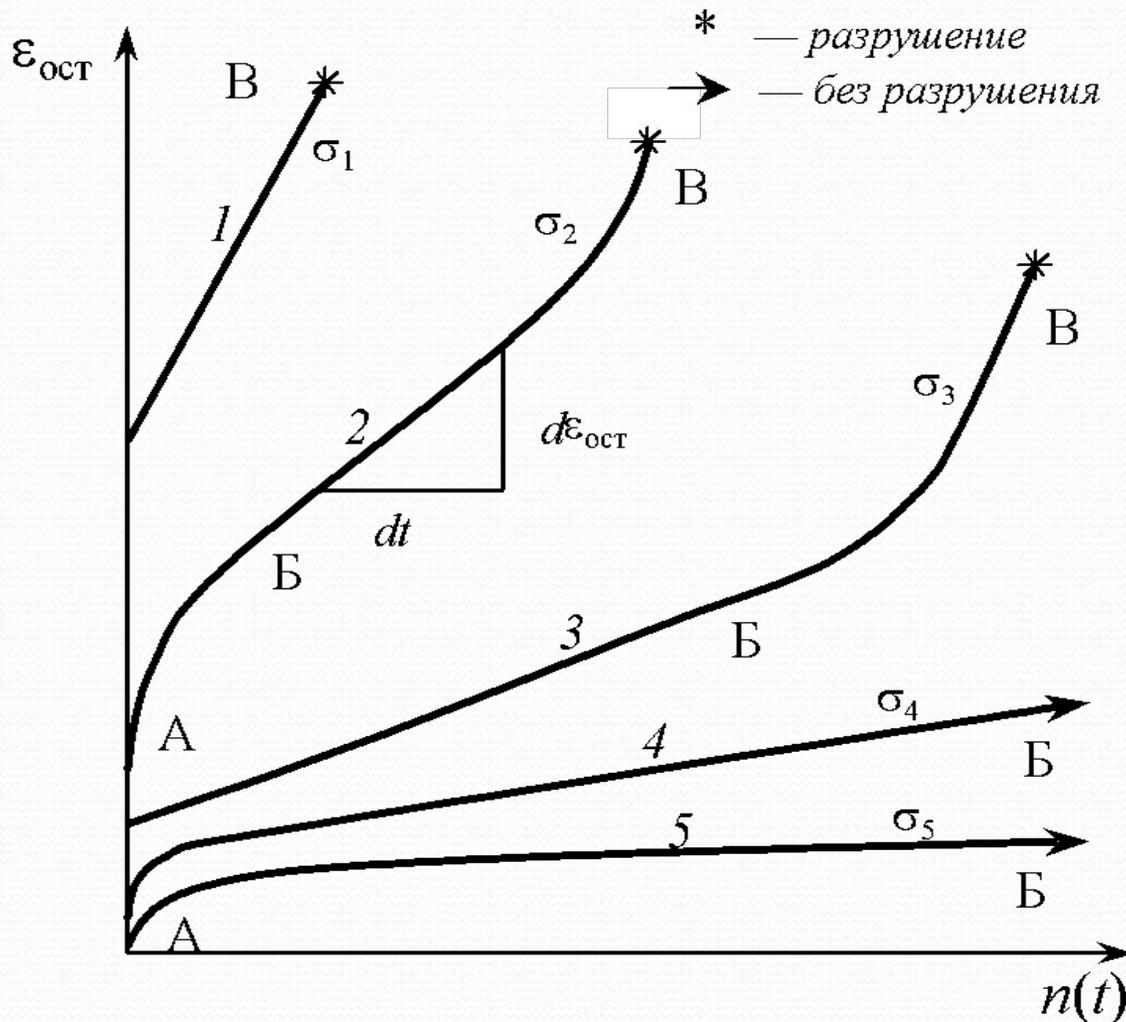
29.4 ЦИКЛИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ-РАЗУПРОЧНЕНИЕ



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

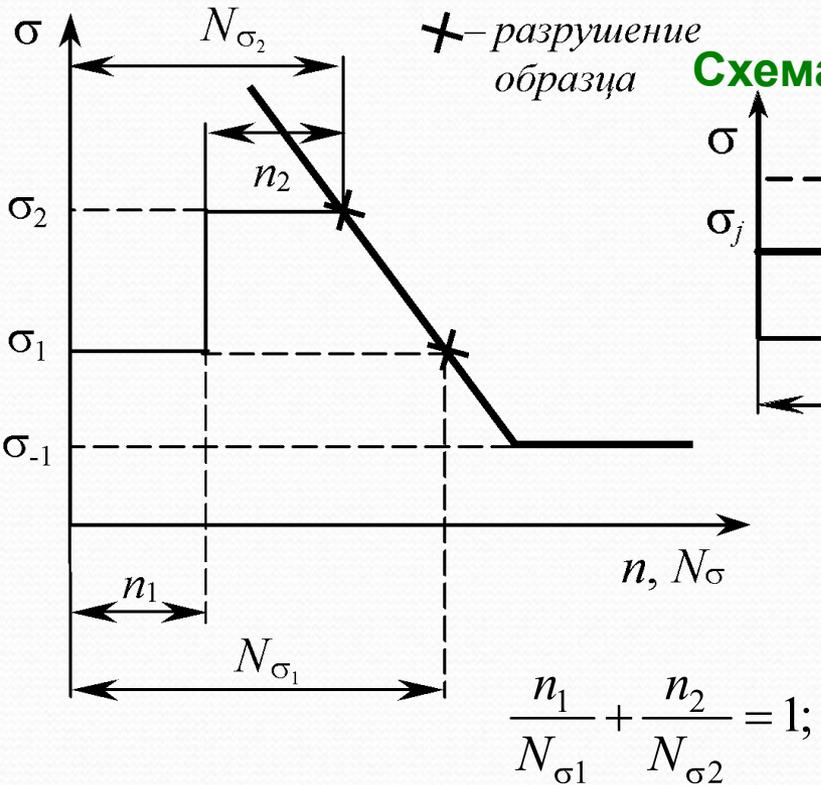
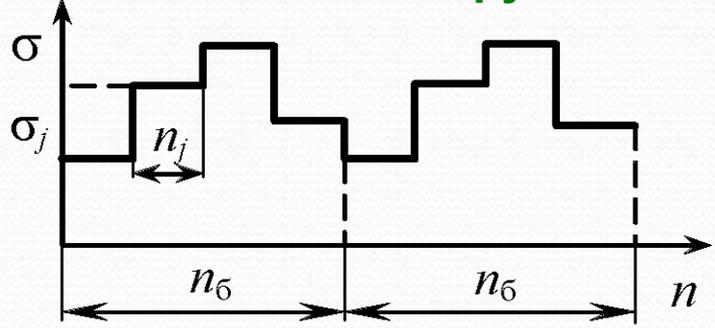


Схема блочного нагружения

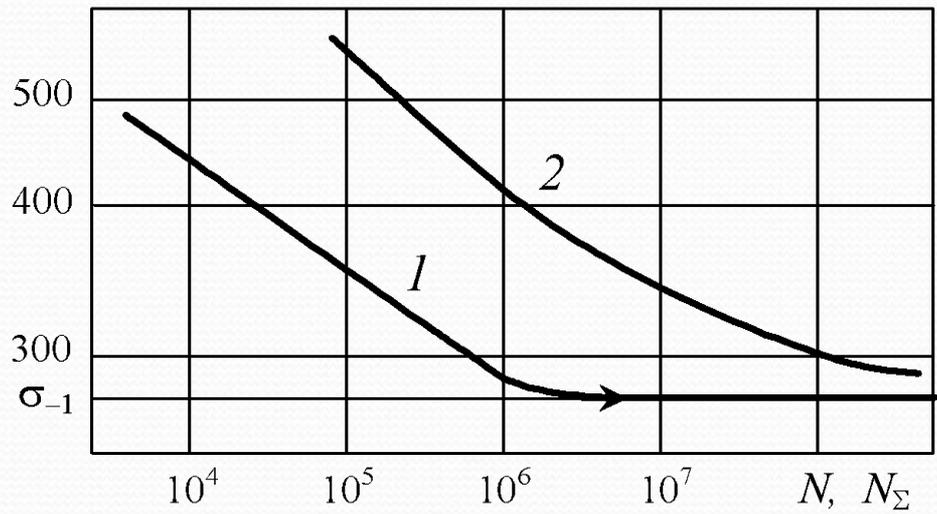


$$D_n = \frac{n_j}{N_{\sigma_j}}. \quad (4.8)$$

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

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

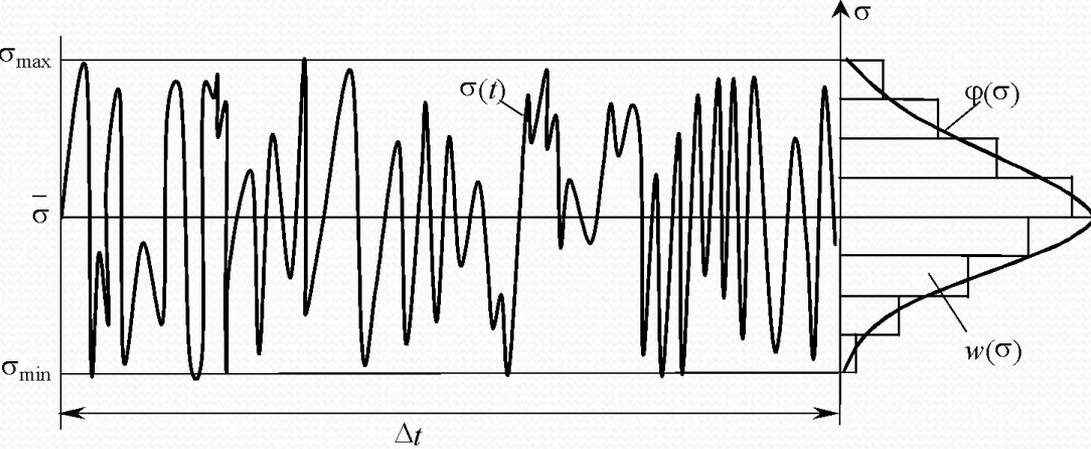
$\sigma_a; \sigma_{a \max}, \text{ МПа}$



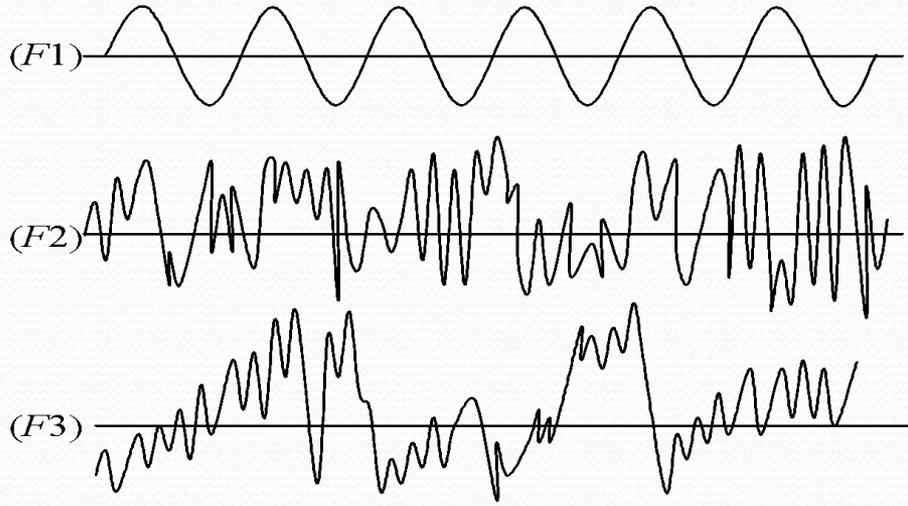
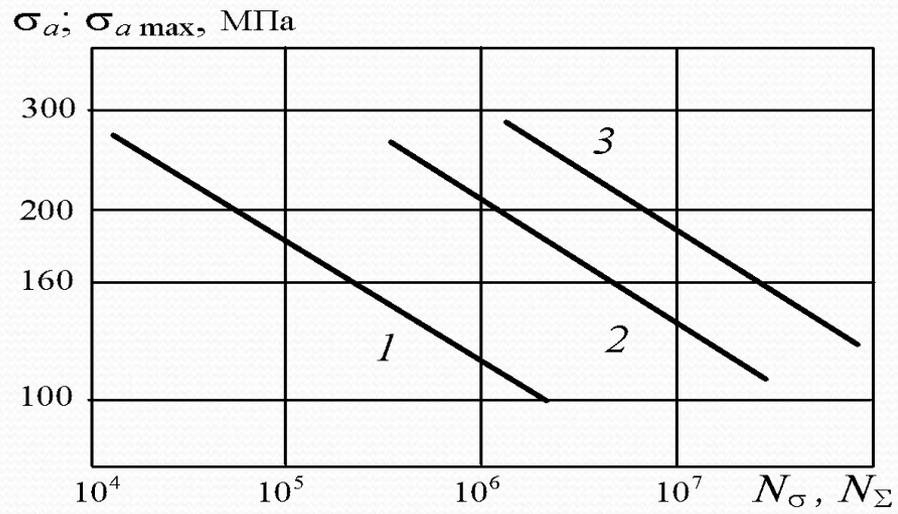
1 (при регулярном нагружении) и
2 (при блочном нагружении)
усталости для среднеуглеродистой стали



СЛУЧАЙНЫЙ ПРОЦЕСС НАГРУЖЕНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ



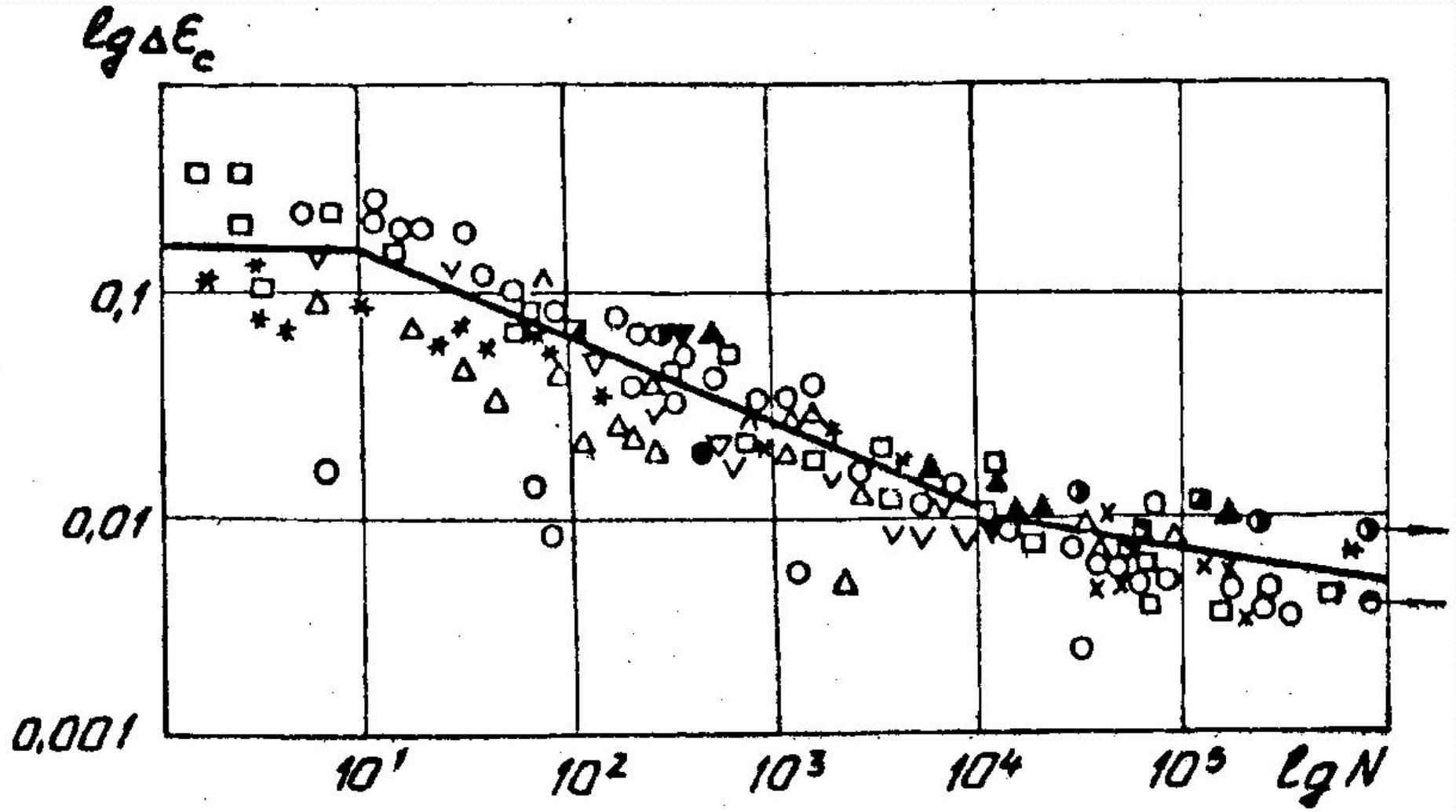
Случайный процесс нагруженности $\sigma(t)$ и его схематизация в ограниченном интервале времени Δt законом распределения $\phi(\sigma)$ действующих напряжений σ либо блоком нагружения $w(\sigma)$



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