

Únava materiálu

- 1) Úvod
- 2) Základní charakteristiky únavového zatěžování
- 3) Křivka únavového života
- 4) Etapy únavového života
- 5) Klíčové vlivy na únavový život

Degradace vlastností materiálu za provozu

- ❑ 1828 W.A.J. Albert - řetězy těžních věží (cyklické zatěžování) Německo
- ❑ 1839 poprvé se objevuje termín „únava“ v knize o mechanice od J.V. Poncelet - Francie
- ❑ 1850 Augustín Wöhler – únavová životnost
- ❑ Gerber, Goodman – vliv středního napětí
- ❑ 1945 Miner – teorie lineární kumulace poškození (1968 Endo – teorie stékajícího deště)
- ❑ 1950 studium fyzikální podstaty vzniku únavového porušení

- Hladká součást (bezpečný život / safe live)

↙

Měkké zatěžování
vysokocyklová únava
Wöhler, Basquin
- železnice, auto,
podvozek letadla

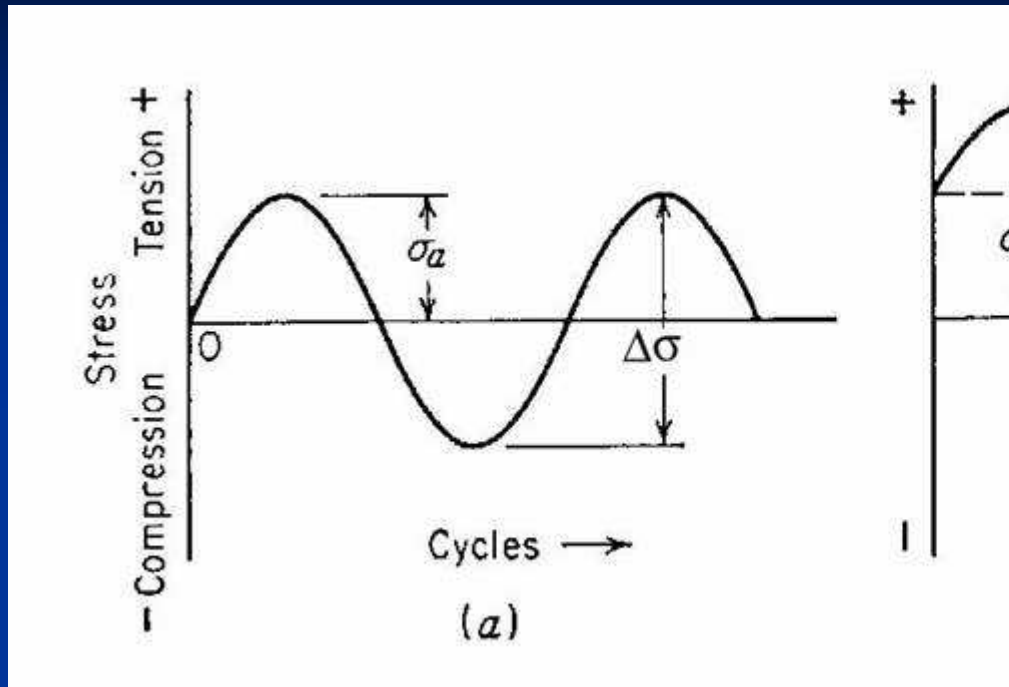
↘

Tvrdé zatěžování
nizkocyklová únava
Manson, Coffin
- tlaková nádoba,
rotor turbíny

- Součást s trhlinou (bezpečný lom / failure safe)

Parisův vztah; podmínky šíření únavové trhliny; měkké zatěžování (drak letadla, most)

Základní charakteristiky cyklického zatěžování



$\sigma_m = \textit{střední napětí}$

$\sigma_{max} = \textit{maximální napětí}$

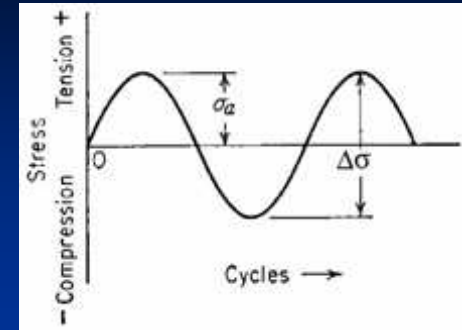
$\sigma_{min} = \textit{minimální napětí}$

$\sigma_a = \textit{amplituda napětí}$

$\Delta\sigma = \textit{rozkmit napětí}$

Základní charakteristiky cyklického zatěžování

Zátěžný cyklus



střídavý

$$\sigma_m < \sigma_a$$

$\sigma_m = 0$ souměrný (symetrický)

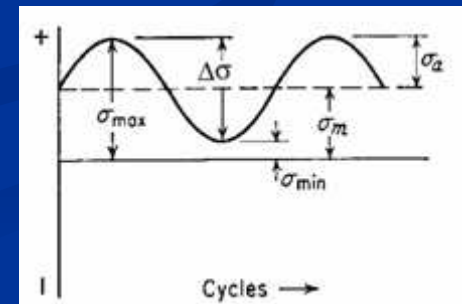
$|\sigma_m| \neq 0$ nesouměrný

pulzující

$$\sigma_m \geq \sigma_a$$

$\sigma_m = \sigma_a$ mívivý

$|\sigma_m| > \sigma_a$ pulzující



Základní charakteristiky cyklického zatěžování

Popis cyklu na základě součinitele
(parametru) asymetrie cyklu

Napět'ový součinitel R

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

$R = 1$ statické zatížení

$R =$ záporné číslo \Rightarrow střídavý

$R =$ kladné číslo \Rightarrow pulzující

$R = 0 \Rightarrow$ míjivý

Základní charakteristiky cyklického zatěžování

Popis cyklu na základě součinitele
(parametru) asymetrie cyklu

Amplitudový součinitel P

$$P = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

$P = 0$ statické zatížení

P má znaménko podle σ_m

$|P| > 1 \Rightarrow$ střídavý

$|P| \leq 1 \Rightarrow$ pulzující (= mívivý)

Základní charakteristiky cyklického zatěžování

Křivka únavového života

- Únavový proces má kumulativní charakter
- Poškození roste s počtem zátěžných cyklů
- Pro každou amplitudu zatížení σ_a (stejná frekvence, teplota, rozměry tělesa) existuje určitý počet cyklů N_f do porušení
- Závislost amplituda napětí ~ počet cyklů do porušení (S-N křivka)

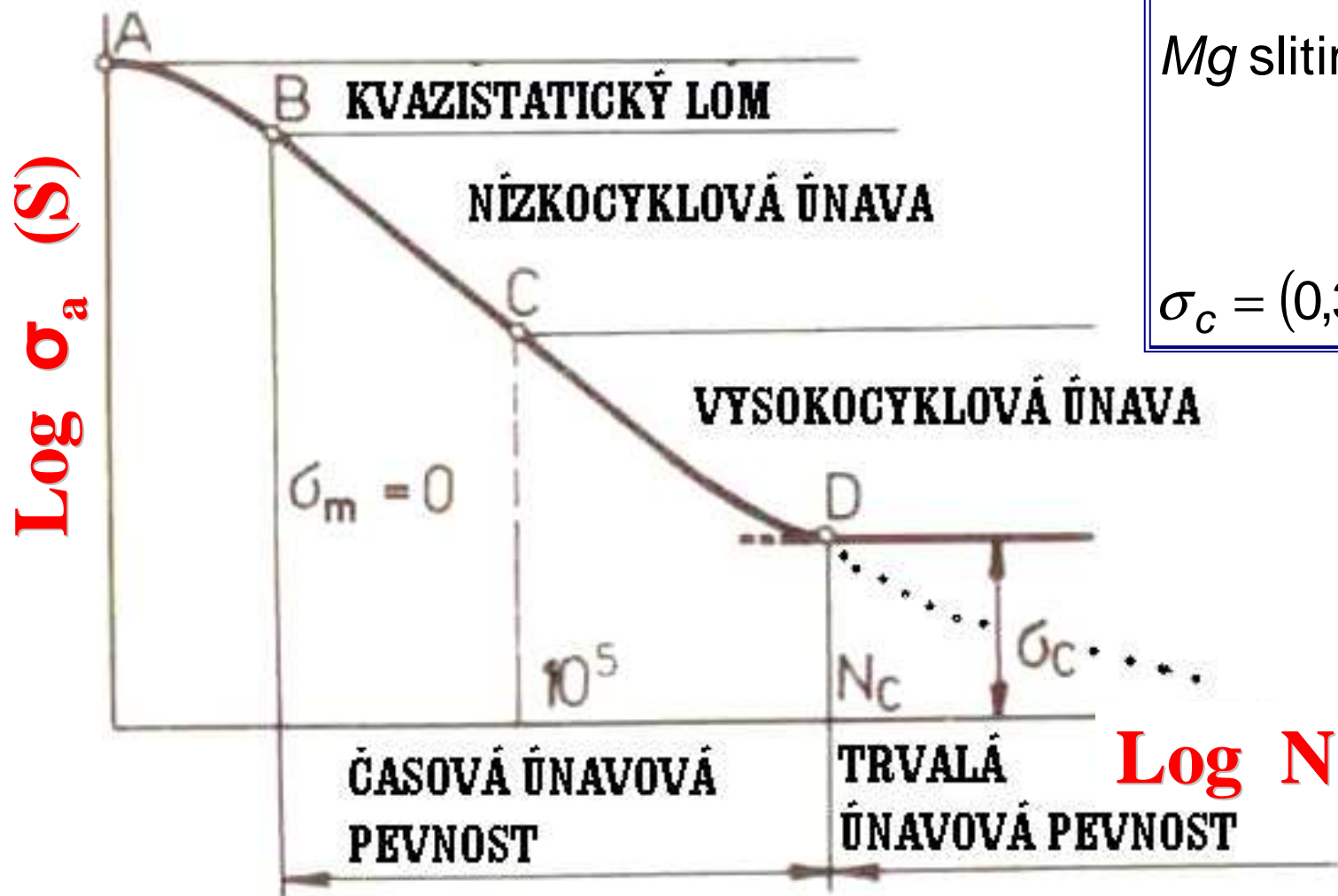
Křivka únavového života

Smluvní mez únavy

Al slitiny $N_f = 5 \cdot 10^8$

Mg slitiny $N_f = 10^8$

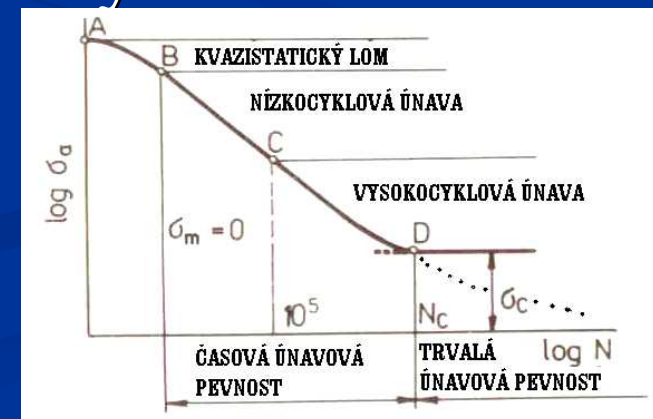
$$\sigma_c = (0,3 \approx 0,5)R_m$$



Křivka únavového života

oblast A - B

- o bod A - amplituda odpovídá hodnotě meze pevnosti R_m - k lomu dojde v prvním, případně po několika málo cyklech
- o lom, který vznikne nemá charakter únavového lomu – proto označení kvazistatický lom.
- o v případě míjivého zatěžovacího cyklu dochází k cyklickému tečení (creepu).



Křivka únavového života

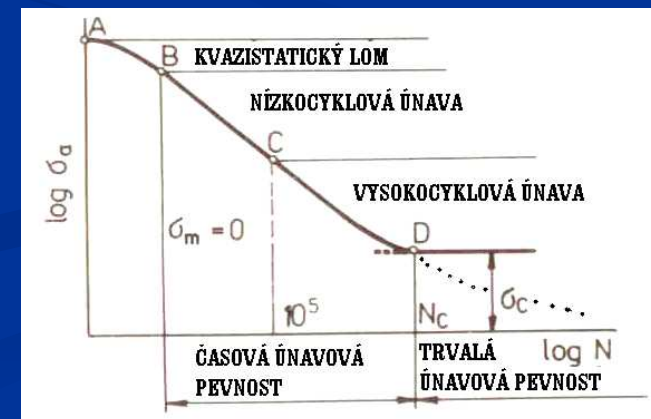
oblast B - C

- o oblast NCÚ – namáhání napětími většími než mez kluzu, servohydraulické zkušební stroje, cyklická hysterezní smyčka, vliv vrubů
- o Manson-Coffin Low-Cycle-Fatigue relationship
Mansonova – Coffinova závislost pro NCÚ:

$$\varepsilon_{a_{pl}} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

ε'_f \equiv součinitel únavové tažnosti

c \equiv exponent únavové životnosti



Křivka únavového života

oblast C

- o Oblast VCÚ – namáhání napětími menšími než mez kluzu, oceli – časová mez únavy, mez únavy (asi 1/3 až 1/2 meze pevnosti u ocelí), neželezné kovy smluvní -mez únavy
- o Pro souměrný cyklus

$$\sigma_{ar} = \sigma'_f (2N_f)^b \dots\dots \text{BASQIN}$$

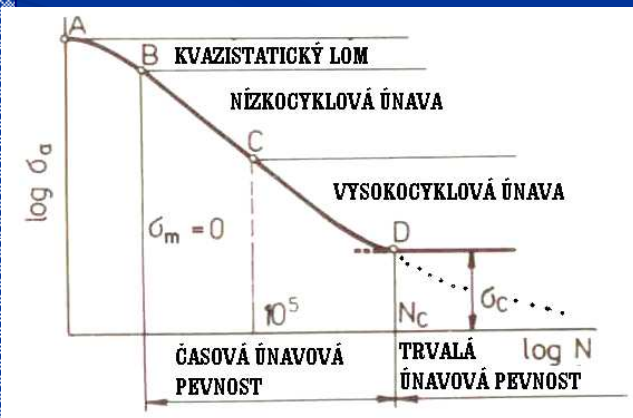
σ'_f

⇒ součinitel únavové pevnosti

b

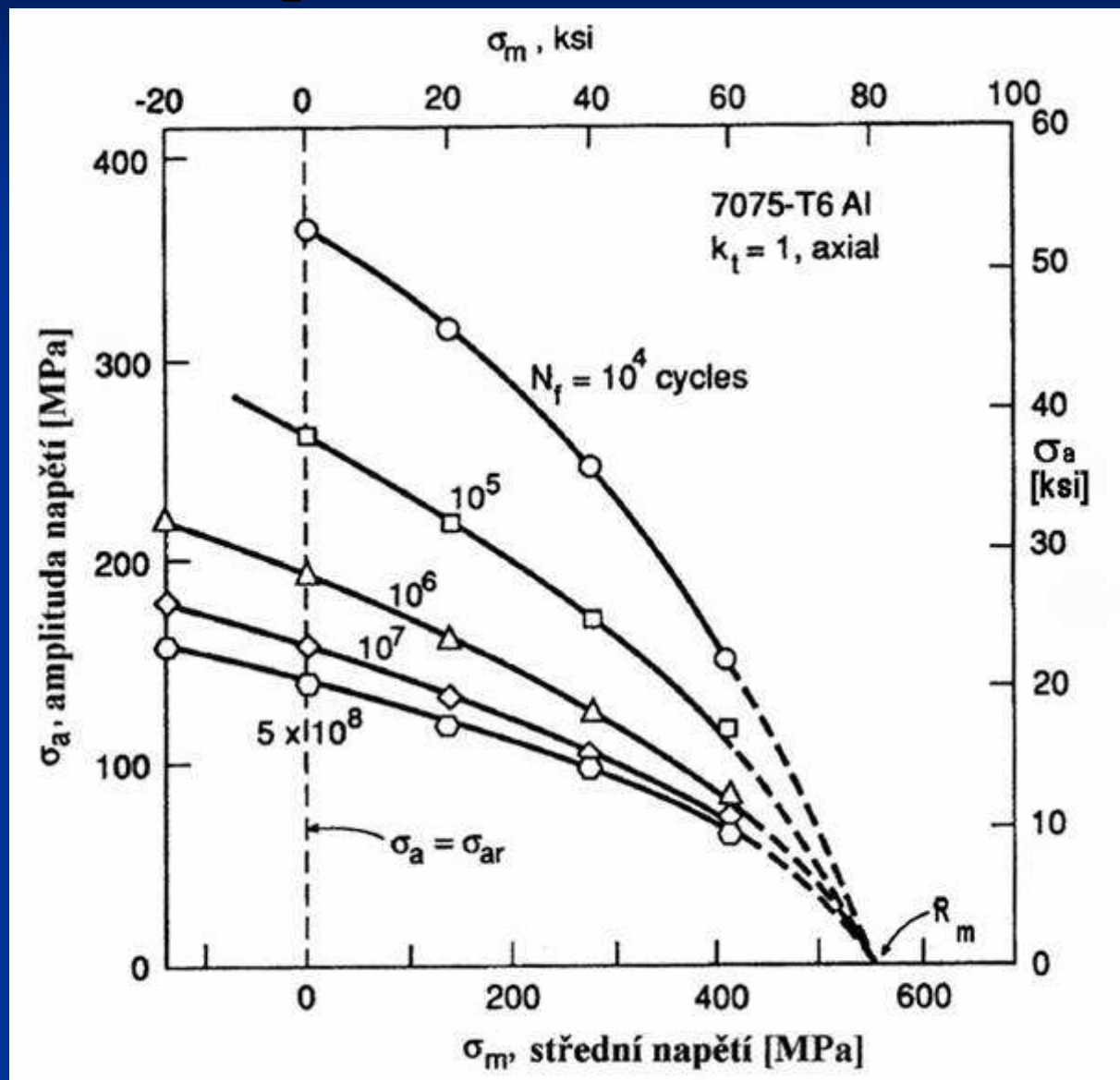
⇒ exponent únavové životnosti

$$\sigma_{ar} = A(N_f)^B \dots\dots\dots \text{WOHLER}$$



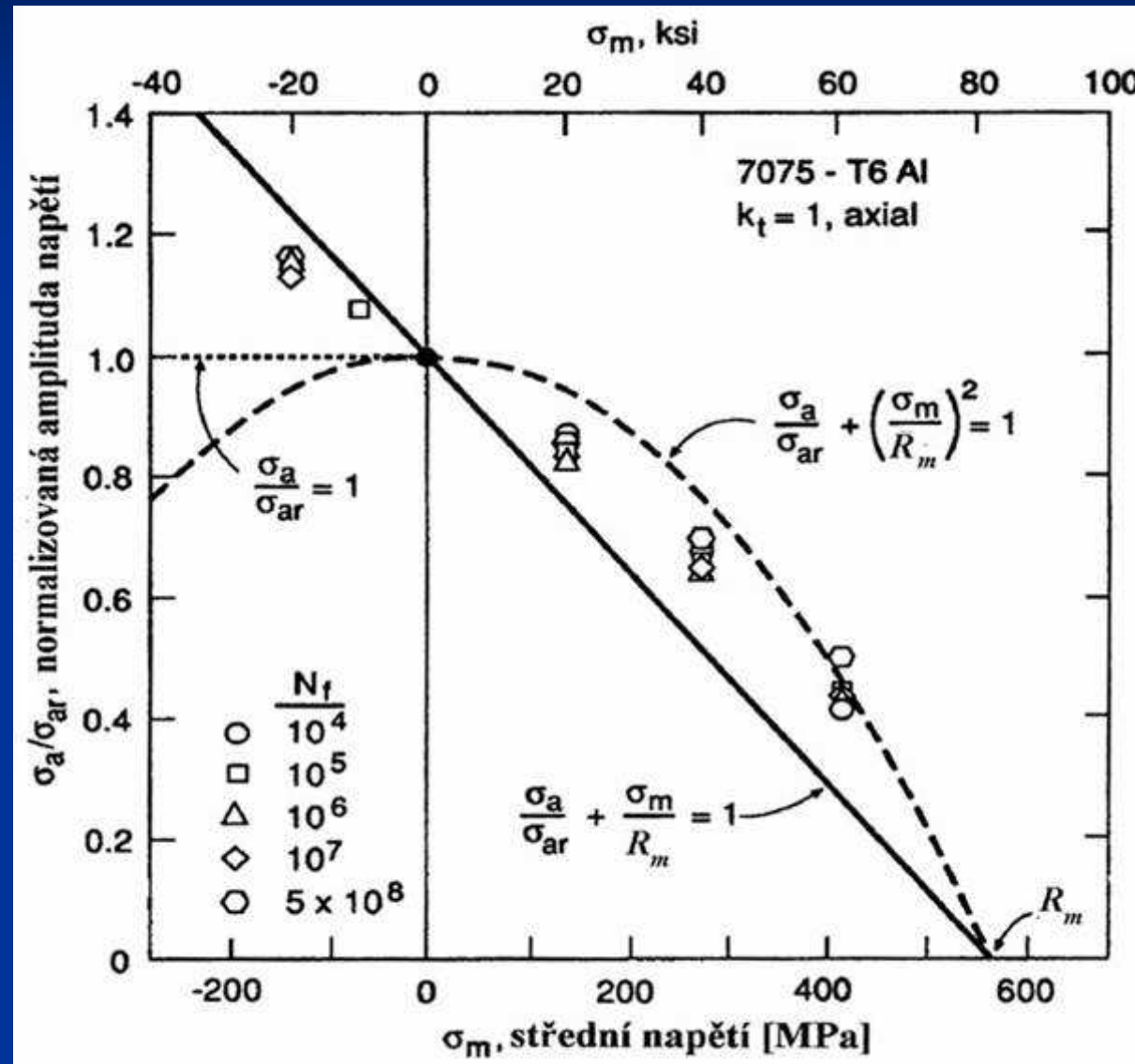
Křivka únavového života

Vliv středního napětí



Křivka únavového života

Vliv středního napětí



Křivka únavového života

Vliv středního napětí na únavovou životnost

Goodman	Gerber
$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1$	$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2 = 1$

σ_a, σ_m

\Rightarrow *amplituda a střední napětí obecného cyklu*

σ_{ar}

\Rightarrow *amplituda souměrného cyklu, při kterém dojde k porušení po stejném počtu cyklů, jako v případě s amplitudou σ_a a středním napětím σ_m*

R_m

\Rightarrow *mez pevnosti*

Křivka únavového života

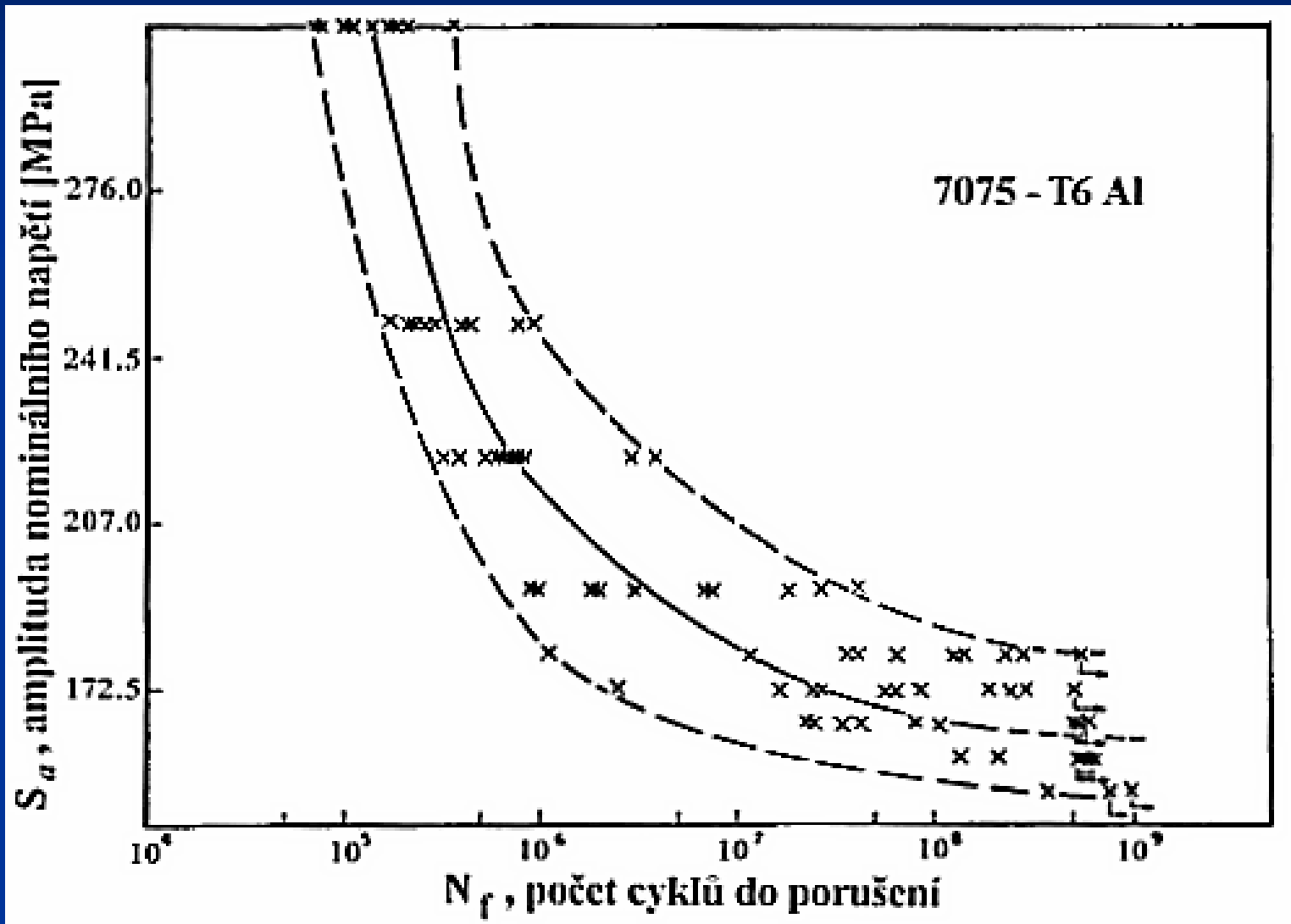
Vliv středního napětí na únavovou životnost

$$\sigma_a = \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \right) A (N_f)^b$$

System S-N křivek obecného tvaru

Křivka únavového života

Vliv:

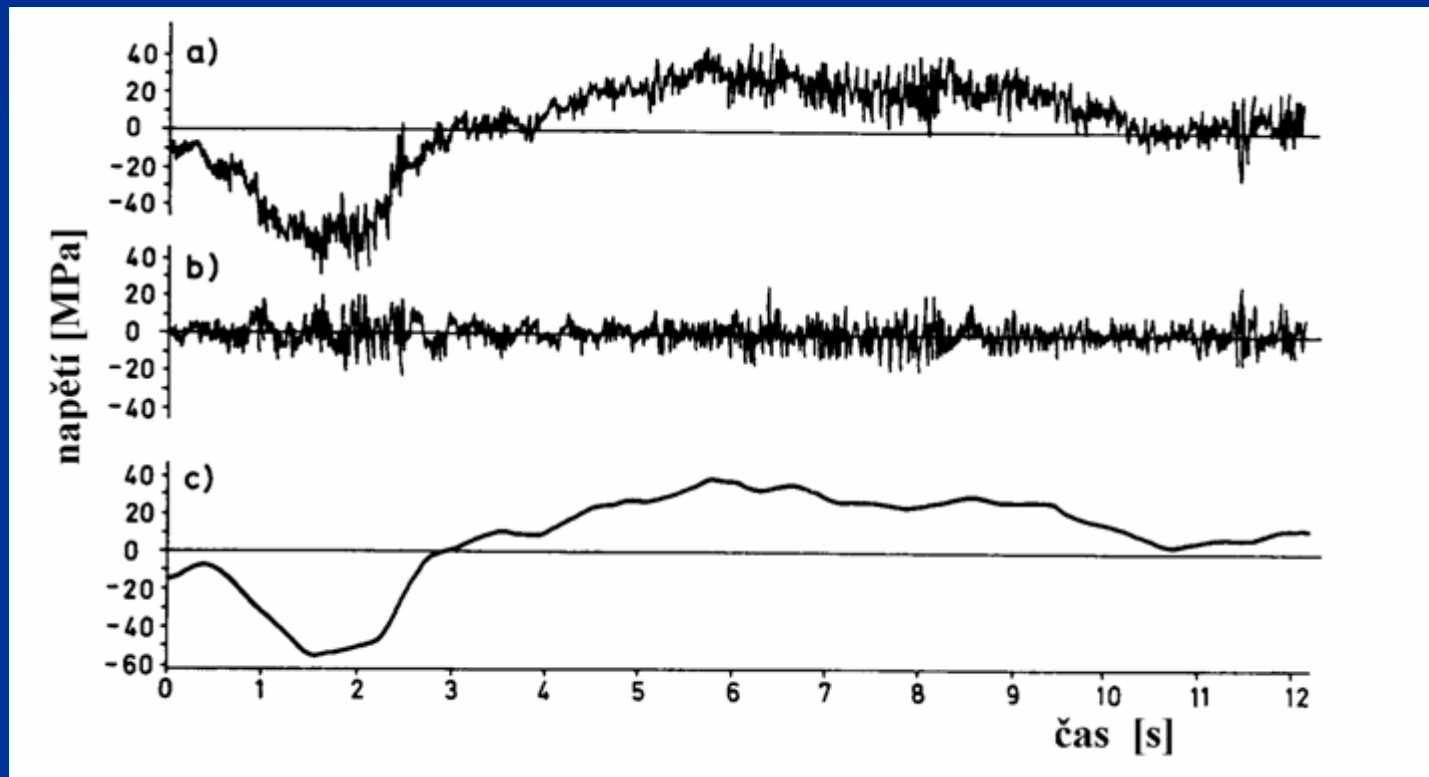


Reálná konstrukce

Kumulace poškození

- zdroje cyklického zatěžování
- změna amplitudy zatěžování

Čep řízení motorového vozidla

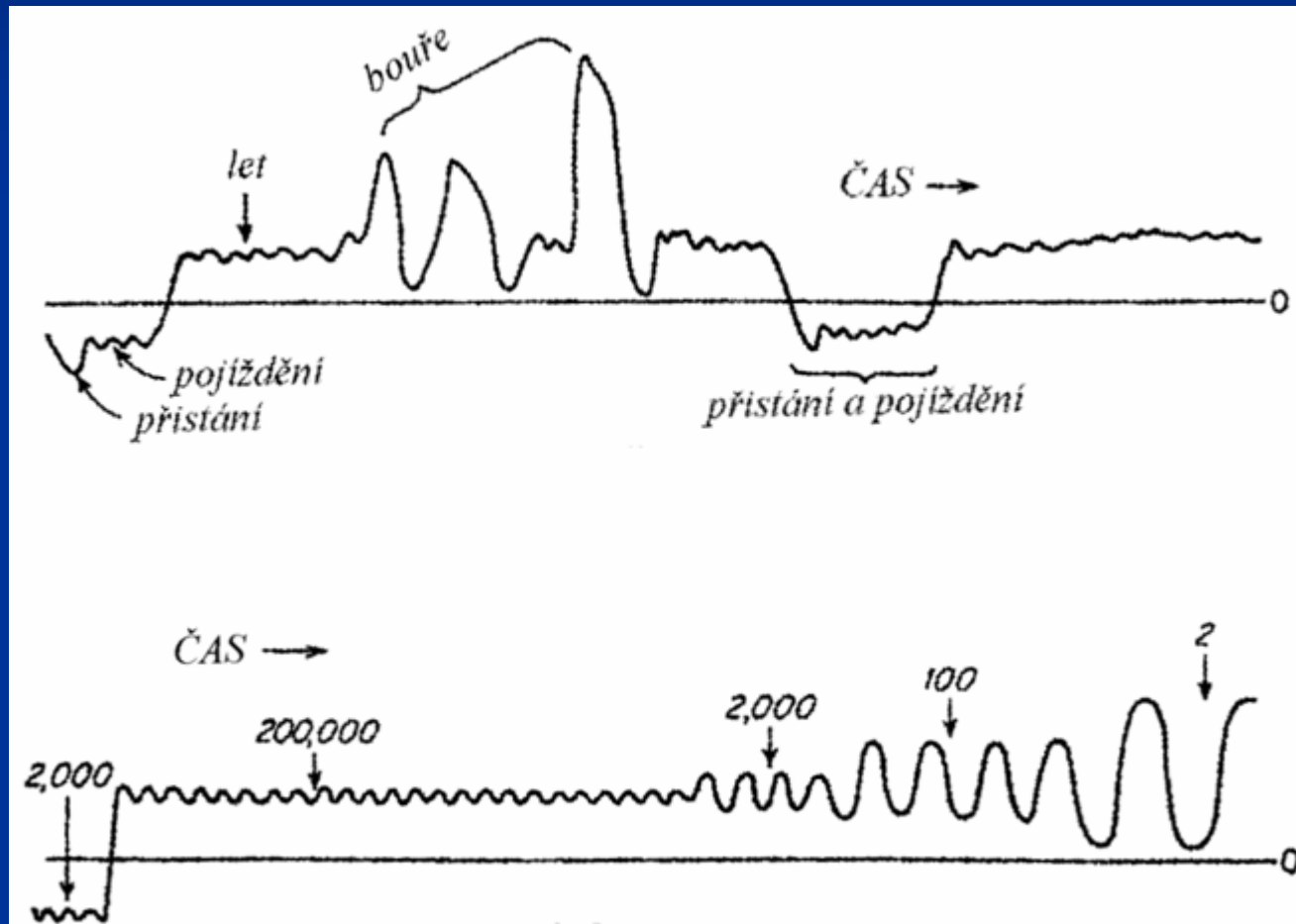


Reálná konstrukce

Kumulace poškození

- zdroje cyklického zatěžování
- změna amplitudy zatěžování

Závěs křídla letadla během provozu



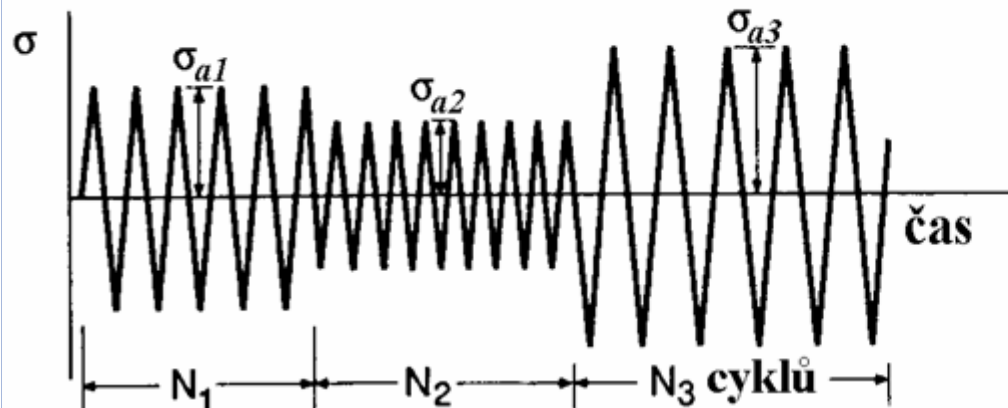
Reálná konstrukce

Kumulace poškození

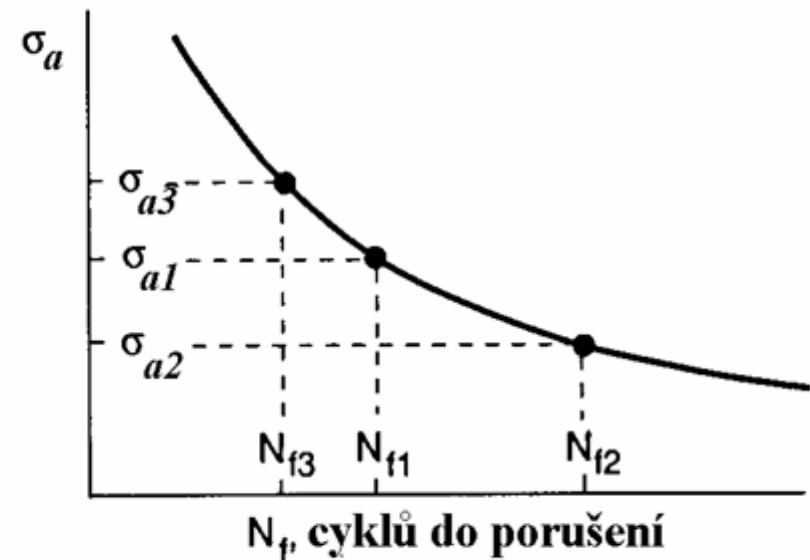
- zdroje cyklického zatěžování
- změna amplitudy zatěžování

vliv cyklování různou amplitudou napětí (MINER)

teorie lineární kumulace poškození – při každém cyklu nastane jisté, vždy stejné poškození, které se během cyklování sčítá (hromadí);



$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots = 1$$



Palmgrenova - Minerova hypotéza

K lomu dojde, jestliže

$$\frac{n_1}{N_f^1} + \frac{n_2}{N_f^2} + \dots = \sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_f^j} = 1$$

Zátěžný blok $(n_1, N_f^1; n_2, N_f^2; n_3, N_f^3)$

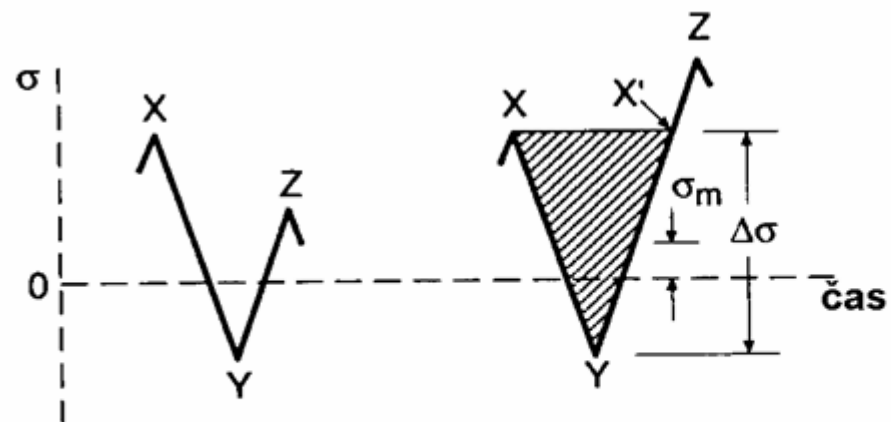
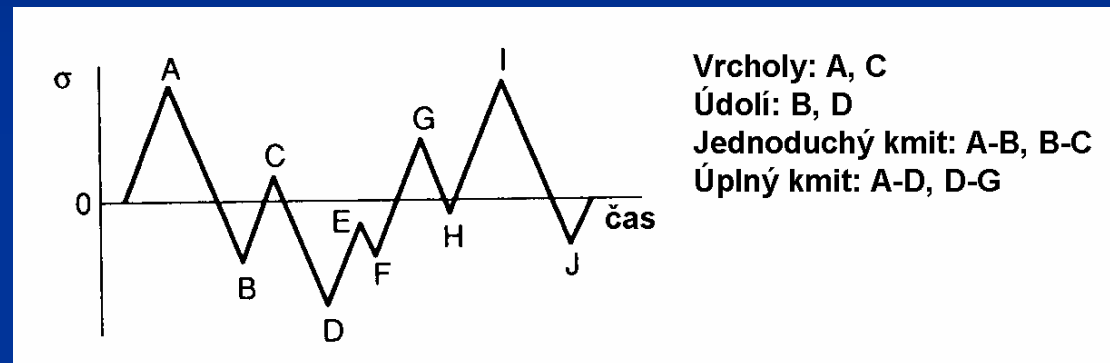
$$B = \frac{1}{\frac{n_1}{N_f^1} + \frac{n_2}{N_f^2} + \frac{n_3}{N_f^3}}$$

$B \Rightarrow$ počet zátěžných bloků, které součást vydrží

Kumulace poškození

Teorie stékajícího deště (Endo 1968)

Zatěžování probíhá v nepravidelných cyklech
(teorie pagod) = co je a co není zátěžný cyklus



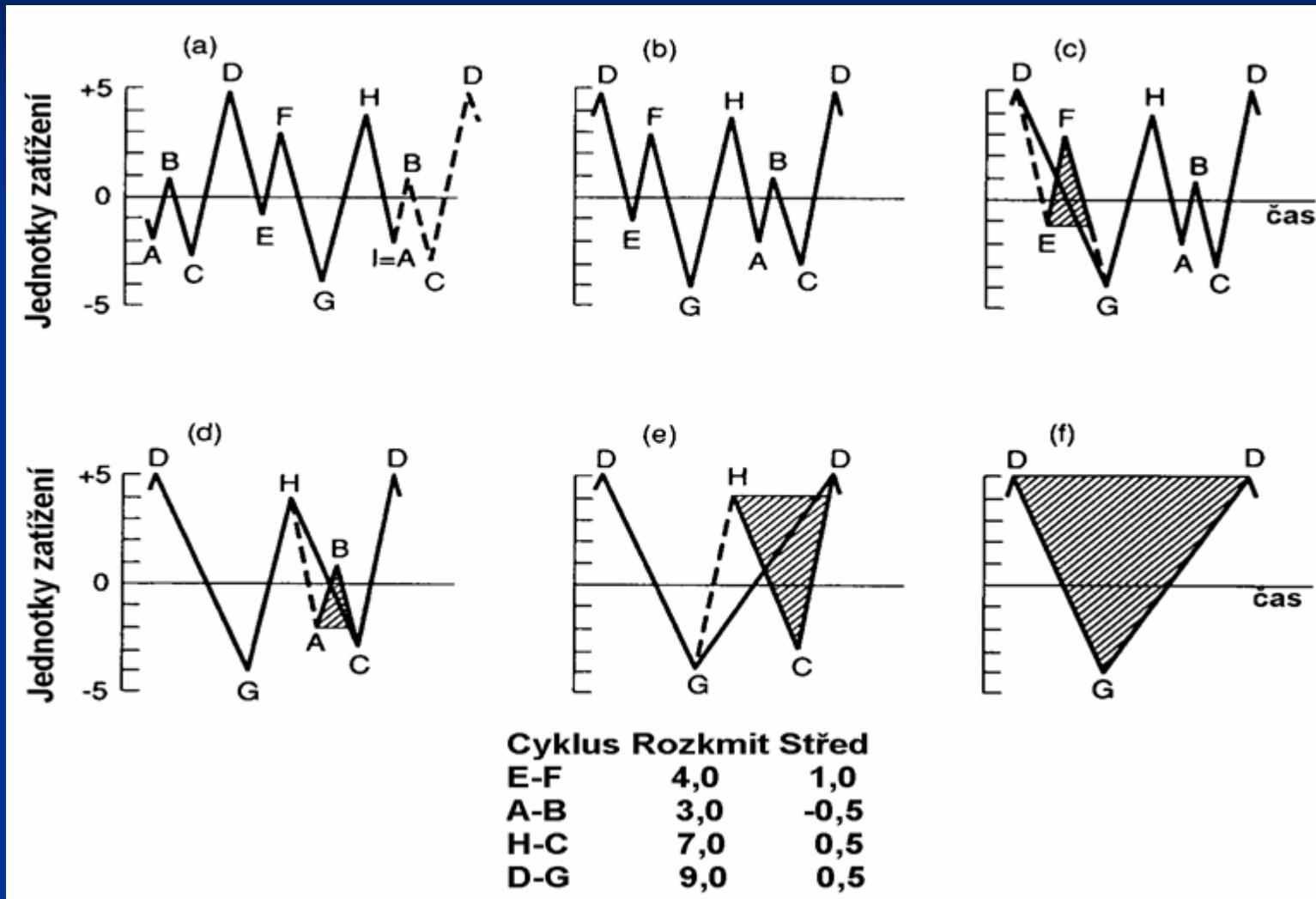
$\Delta\sigma_{YZ} < \Delta\sigma_{XY}$
není cyklus

$\Delta\sigma_{YZ} \geq \Delta\sigma_{XY}$
X-Y = cyklus

Vrchol: σ_X
Údolí: σ_Y
Rozkmit: $\Delta\sigma = \sigma_X - \sigma_Y$
Střed: $\sigma_m = (\sigma_X + \sigma_Y)/2$

Kumulace poškození

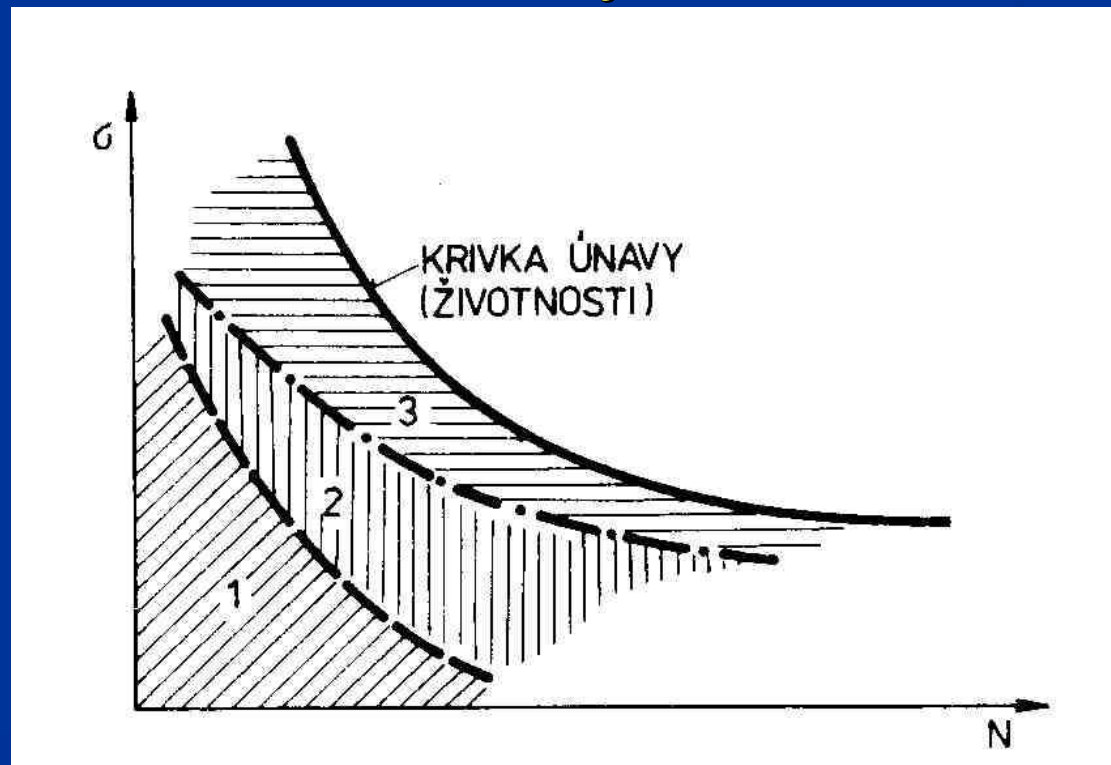
Teorie stékajícího deště (Endo 1968)



ASTM E 1049 – kovy; ASTM D671 - plasty

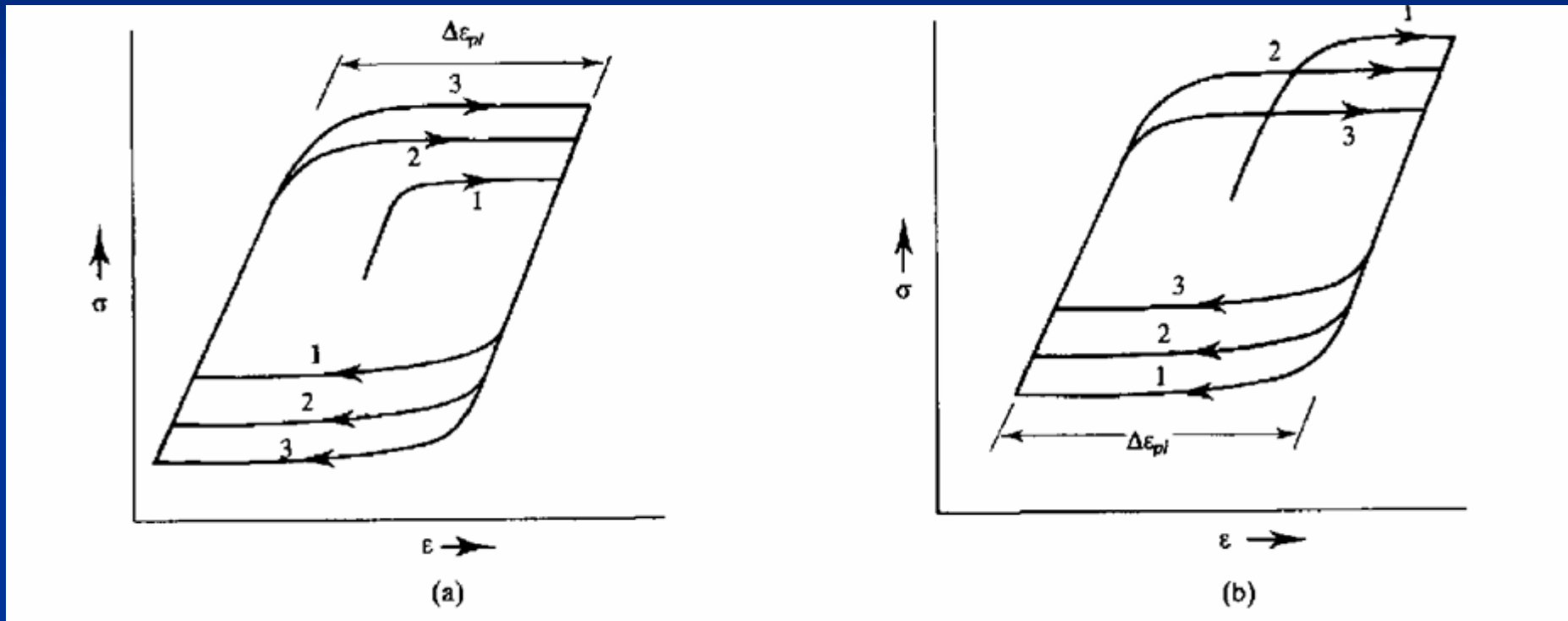
Etapy únavového života

- 1) Stádium změn mechanických vlastností
- 2) Stádium iniciace únavových trhlin
- 3) Stádium šíření únavové trhliny



Etapy únavového života

Stádium změn mechanických vlastností

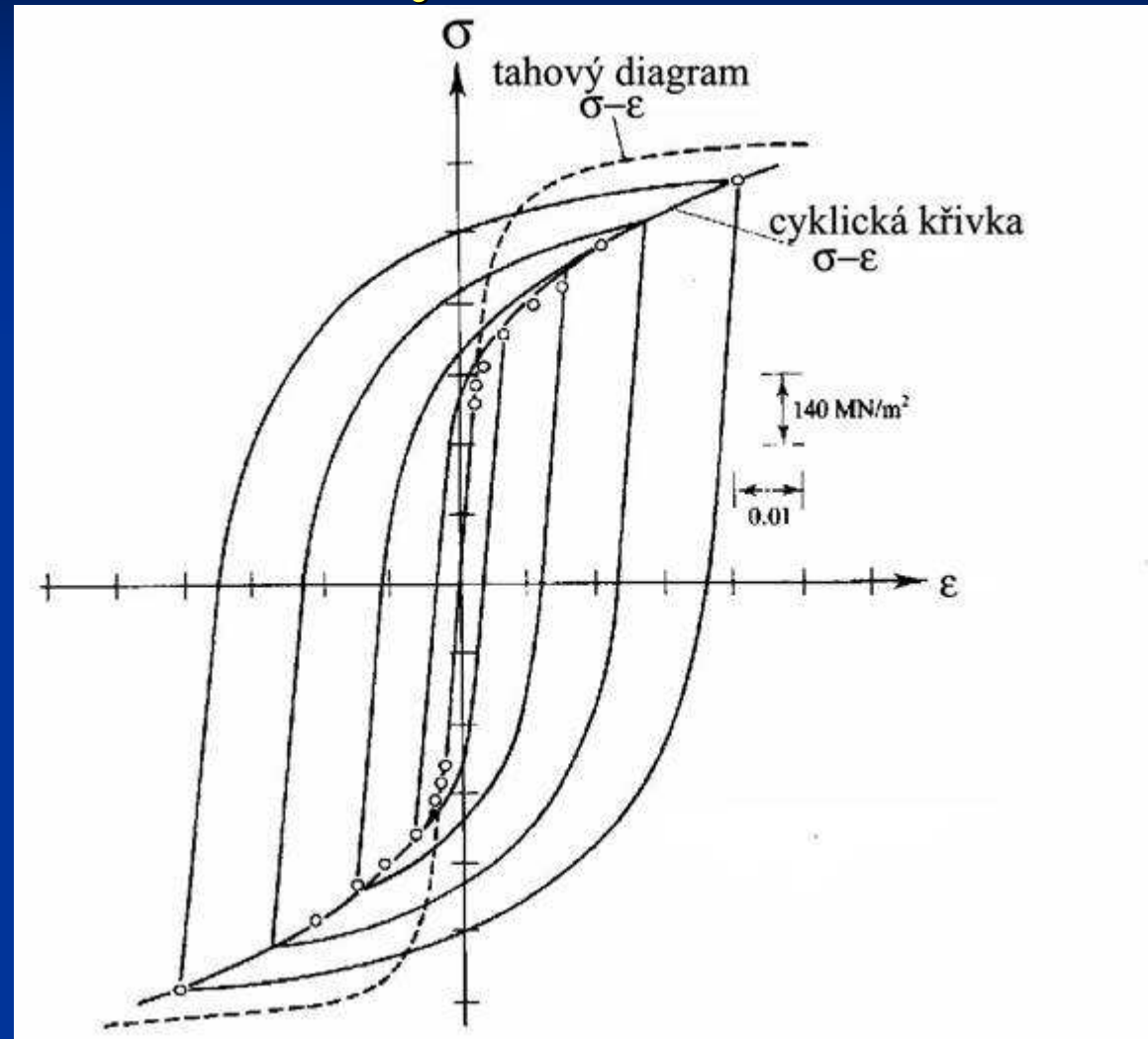


a) materiál cyklicky zpevňuje

b) materiál cyklicky změkčuje

Etapy únavového života

Stádium změn mechanických vlastností

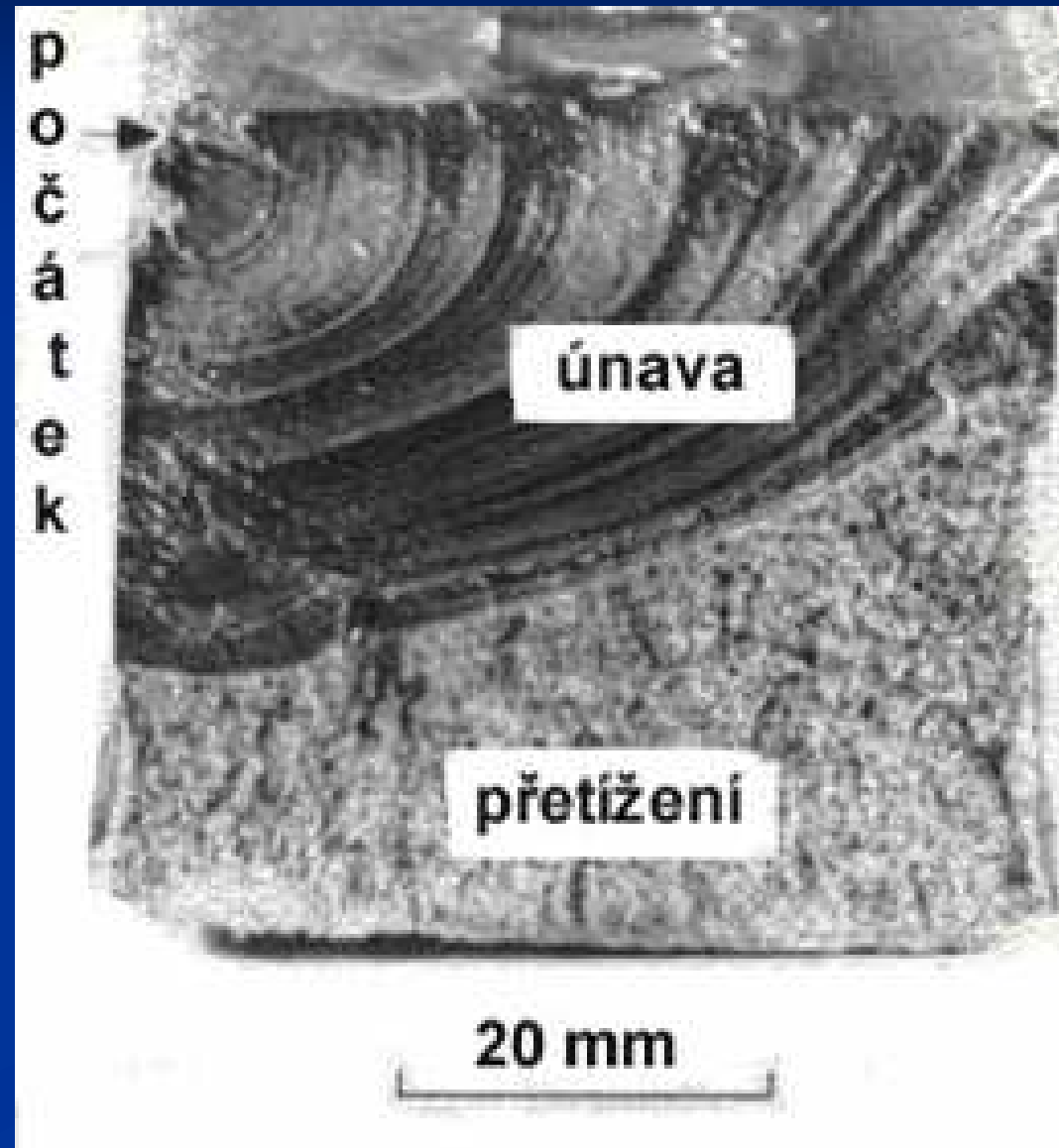


Monotónní a cyklická křivka napětí – deformace oceli 4340

Etapy únavového života

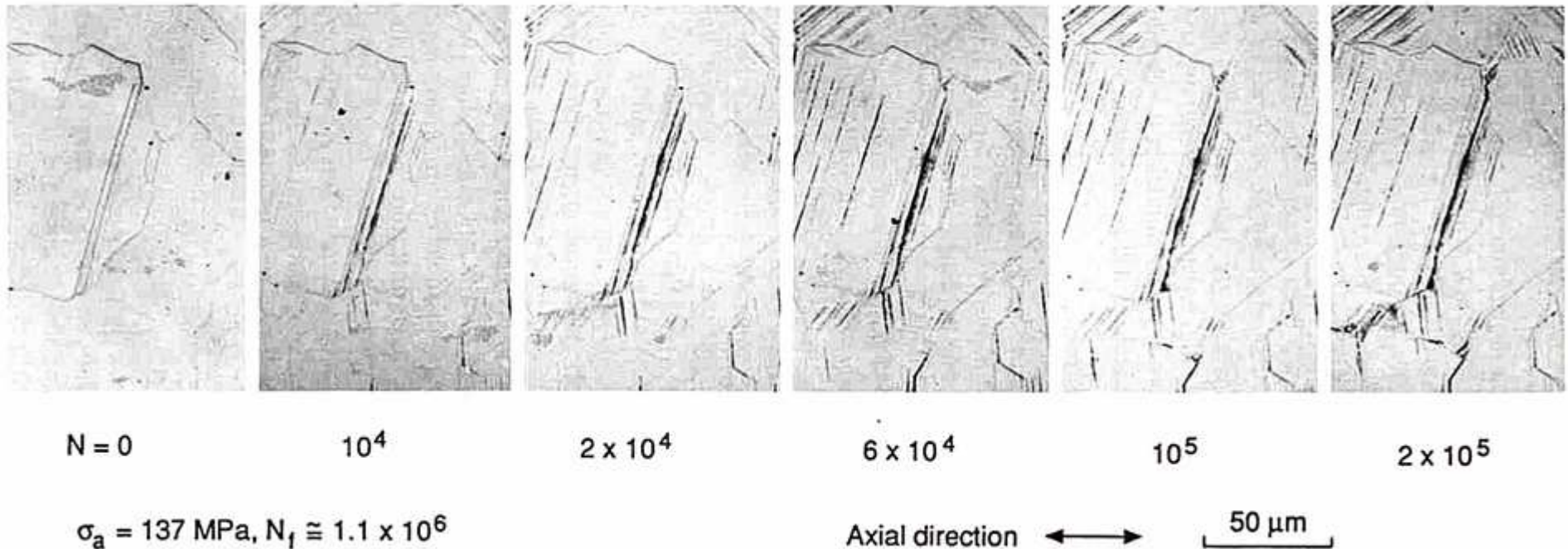
Stádium iniciace únavové trhliny

Únavový lom vzniká
vždy od povrchu
součásti / zkušebního tělesa



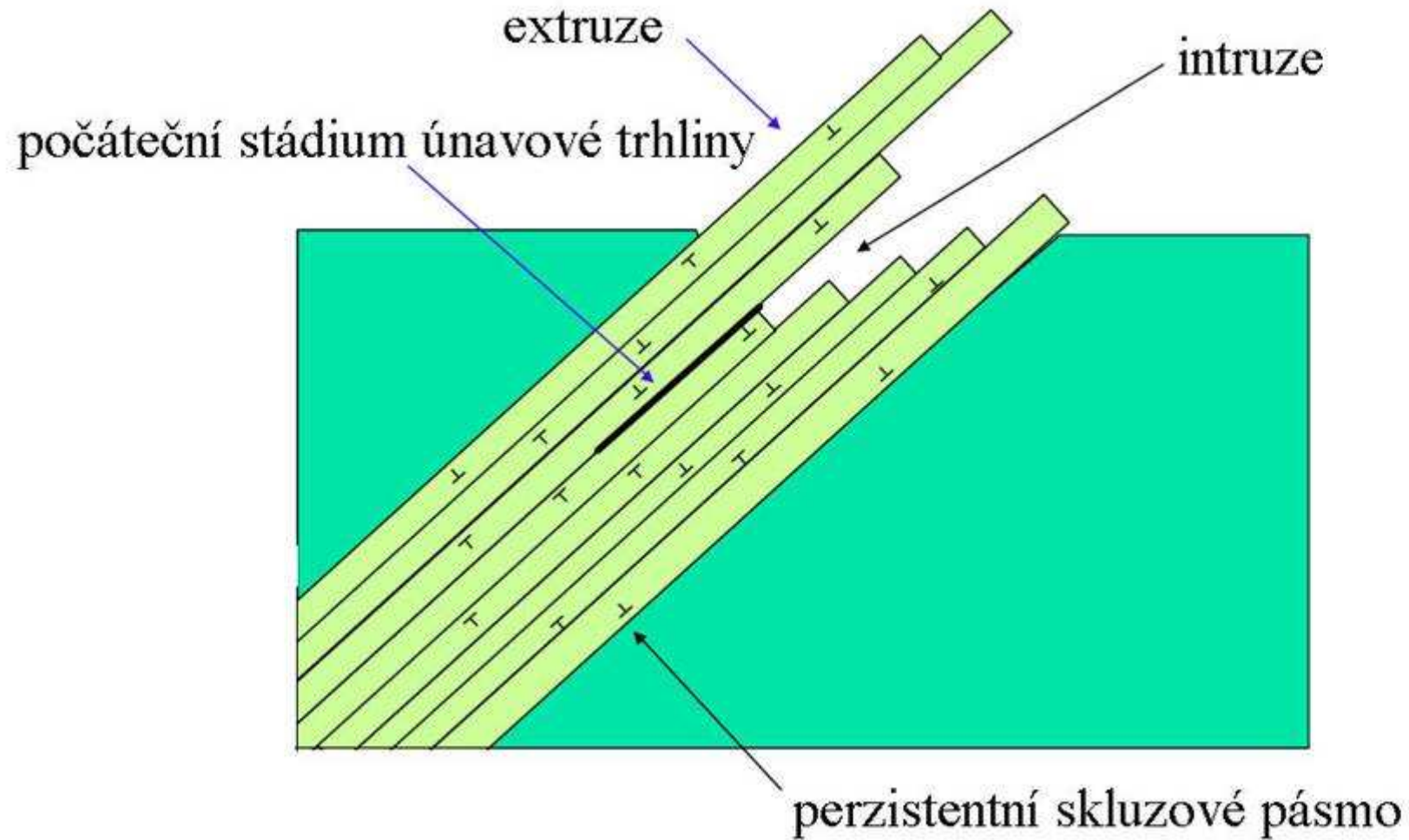
Etapy únavového života

Stádium iniciace únavové trhliny



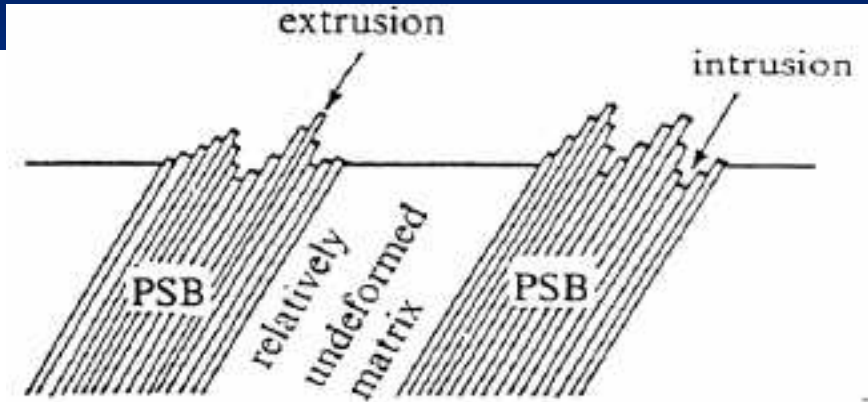
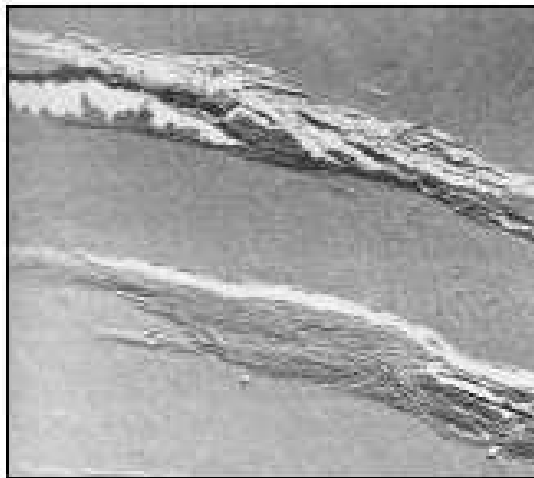
Etapy únavového života

Stádium iniciace únavové trhliny

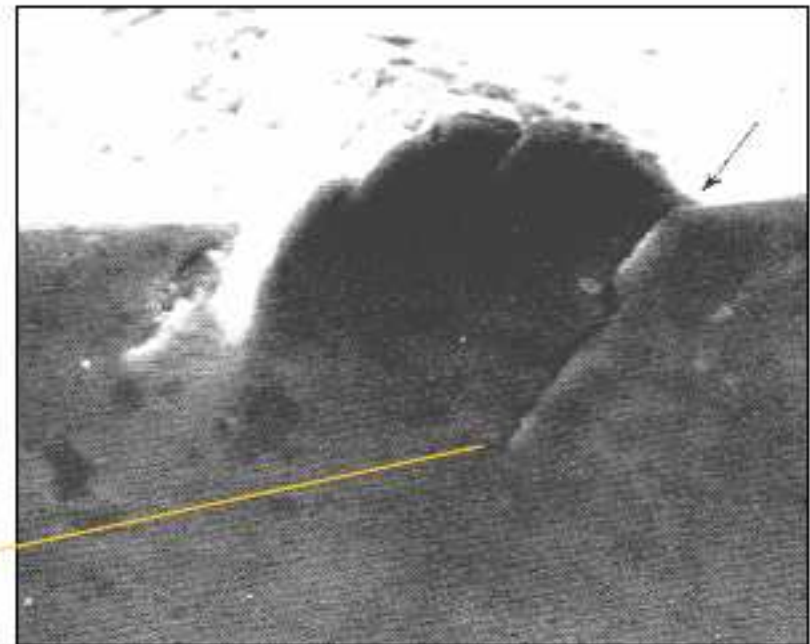
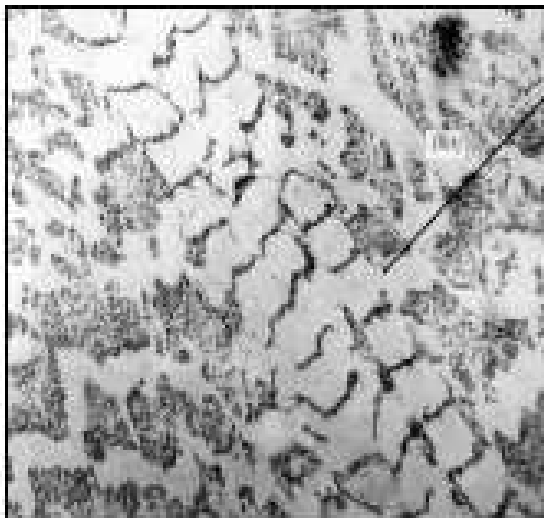


Etapy únavového života

Stádium iniciace únavové trhliny (Preliminary Slip Bend)

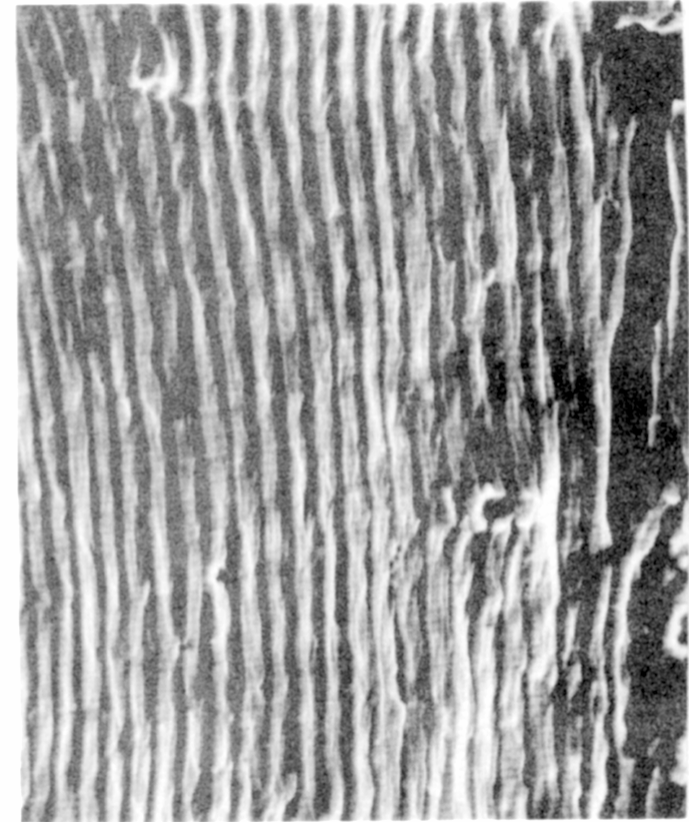


PSE

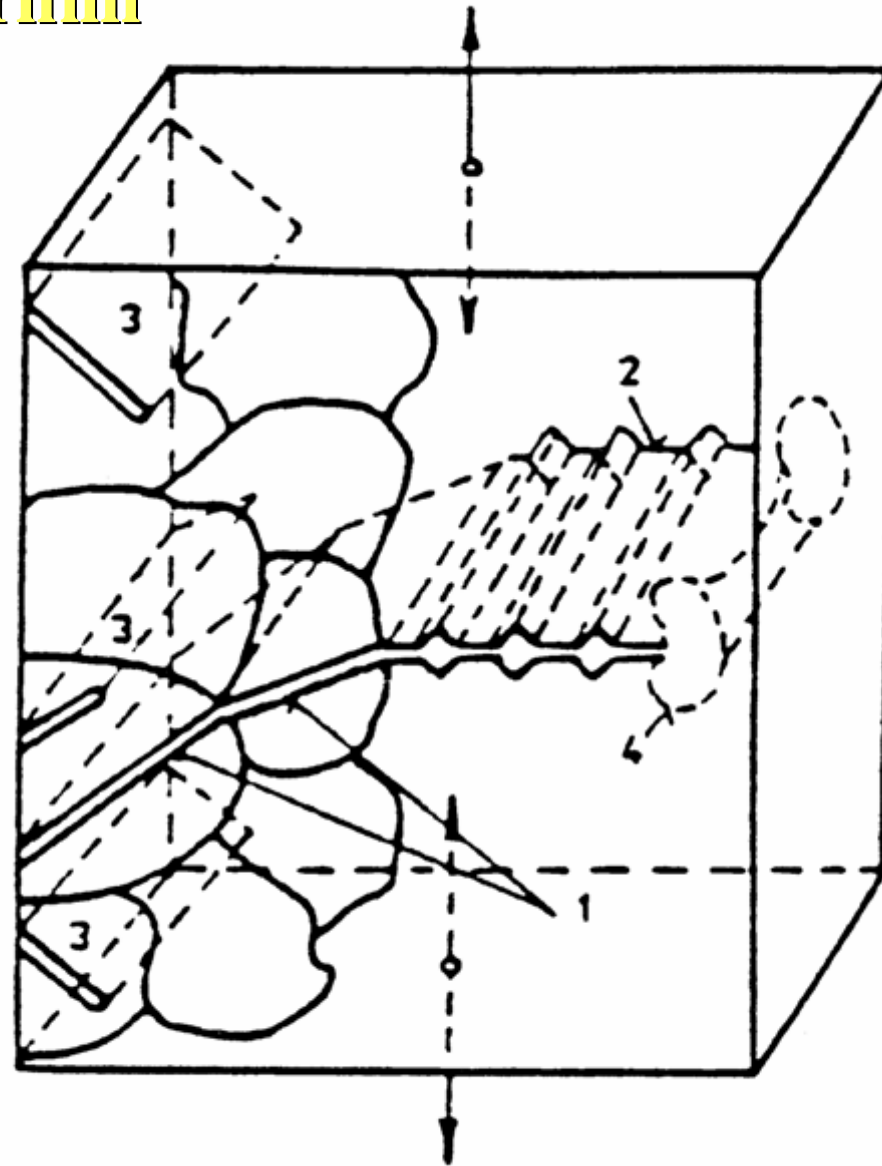


Etapy únavového života

Stádium šíření únavových trhlin



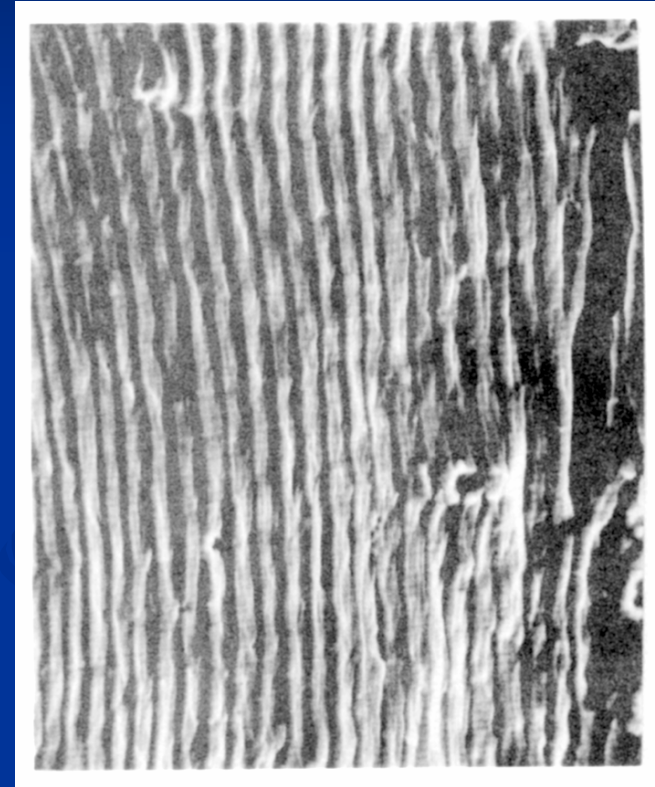
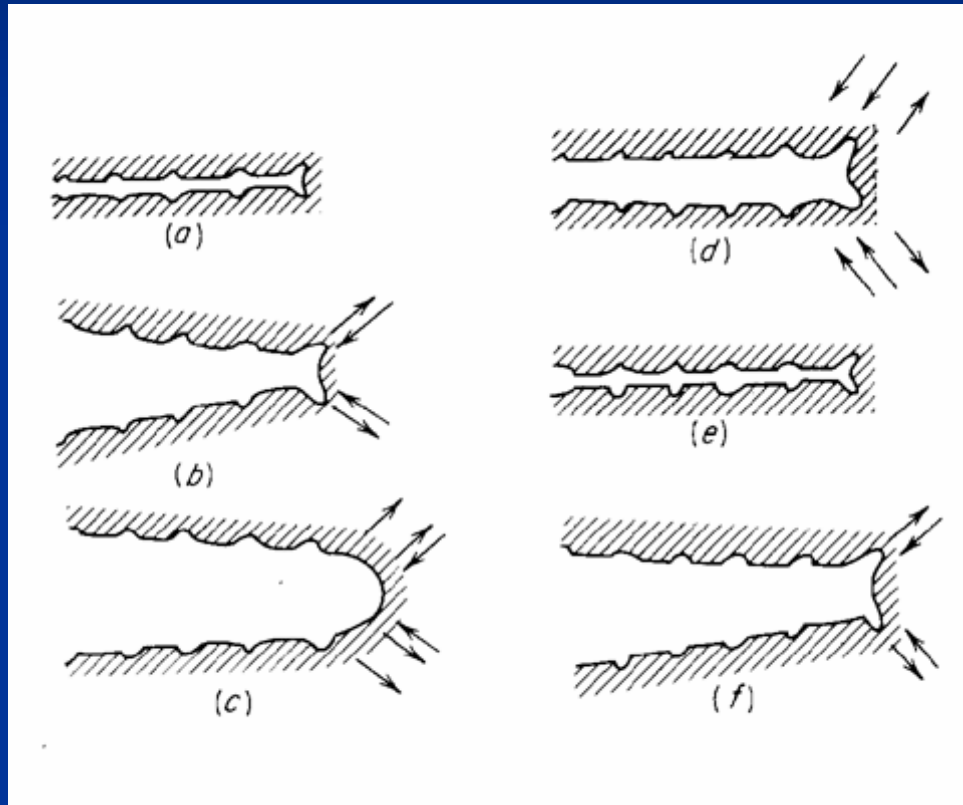
striace



Etapy únavového života

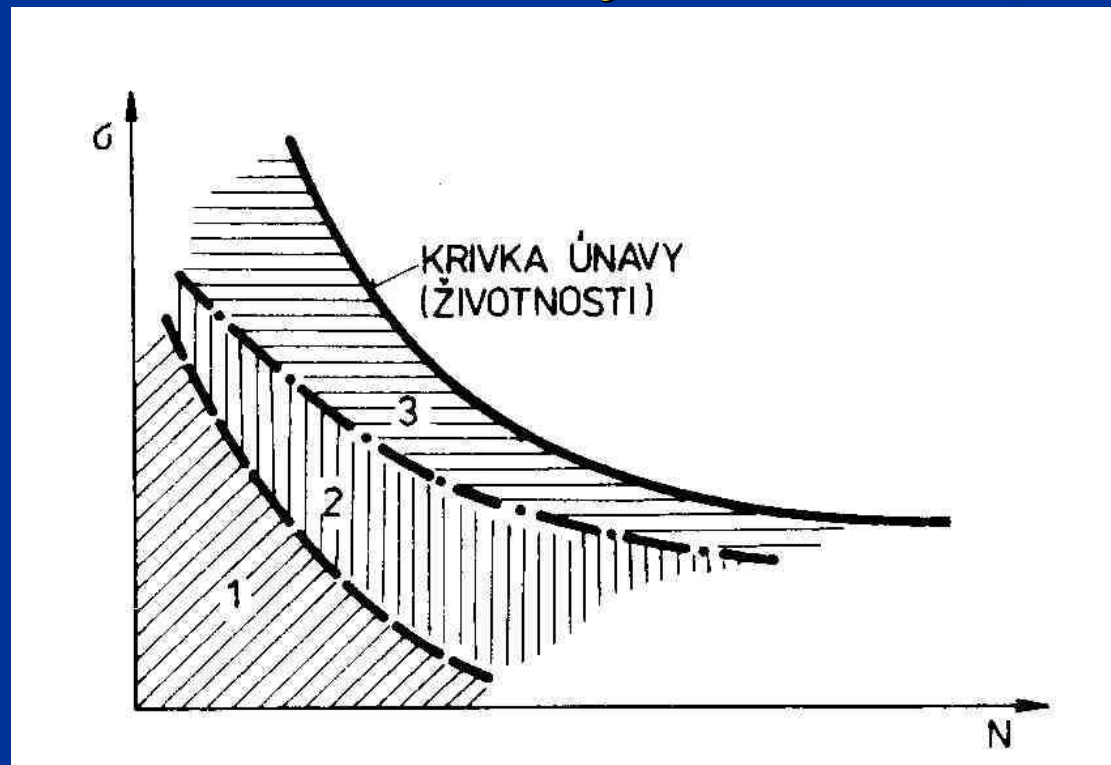
Stádium šíření únavových trhlin

striace



Etapy únavového života

- 1) Stádium změn mechanických vlastností
- 2) Stádium iniciace únavových trhlin
- 3) Stádium šíření únavové trhliny



Etapy únavového života

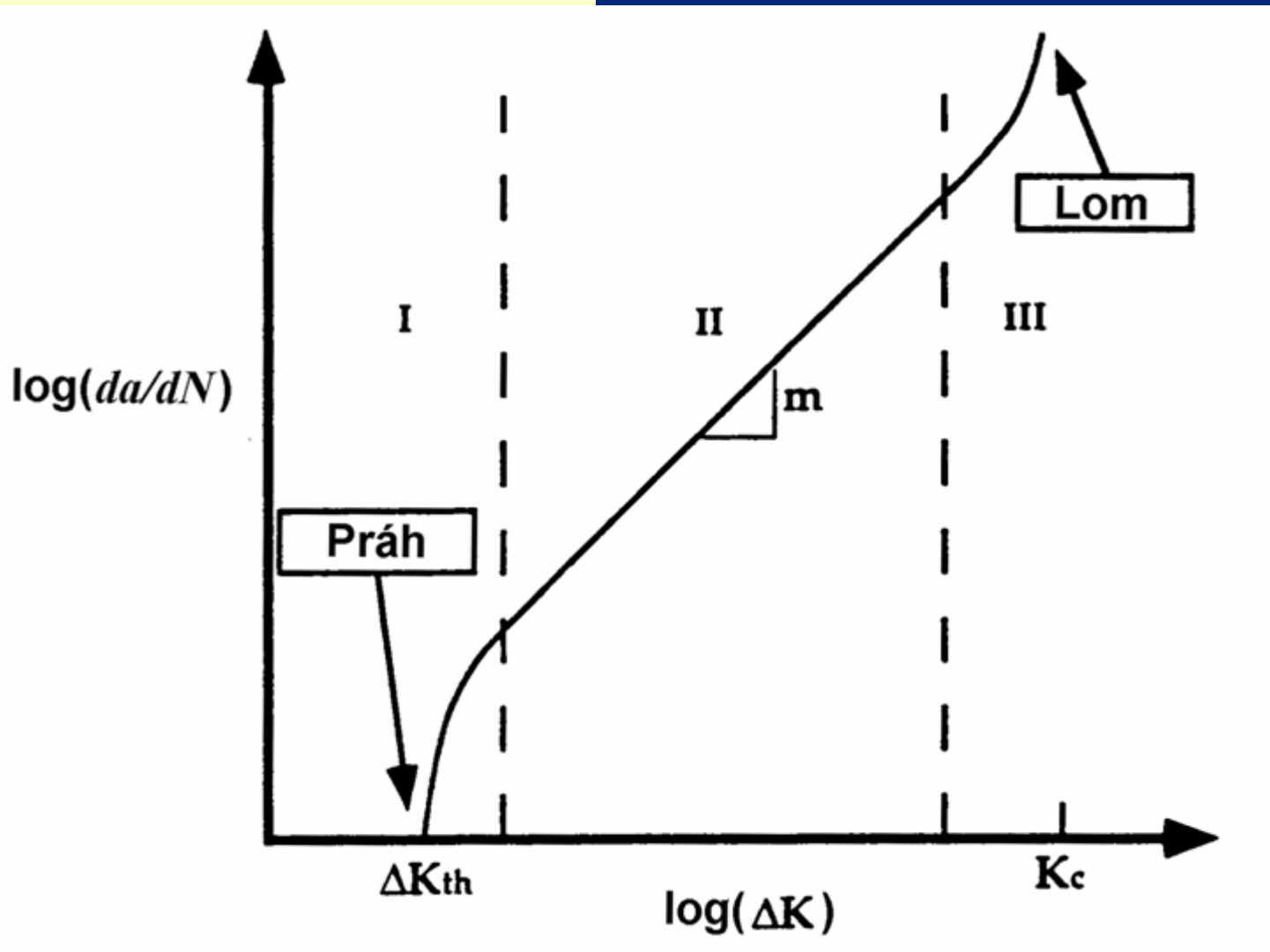
Stádium šíření únavových trhlin

$$\frac{da}{dN} = f(\dots)$$

$$\Delta K_I = (K_{max} - K_{min})$$

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$$

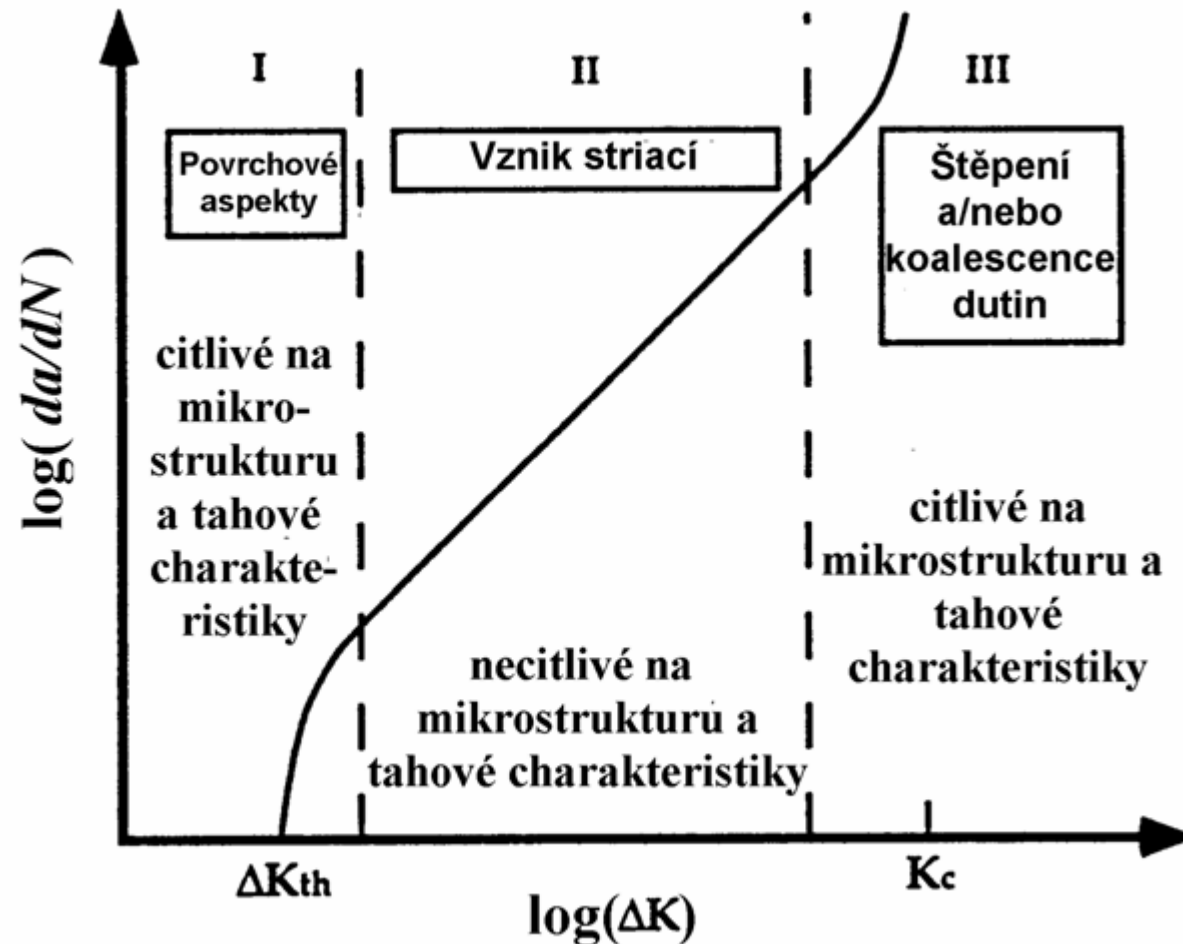
$$\Omega = \text{závislost}$$



Etapy únavového života

Stádium šíření únavových trhlin

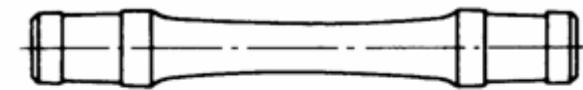
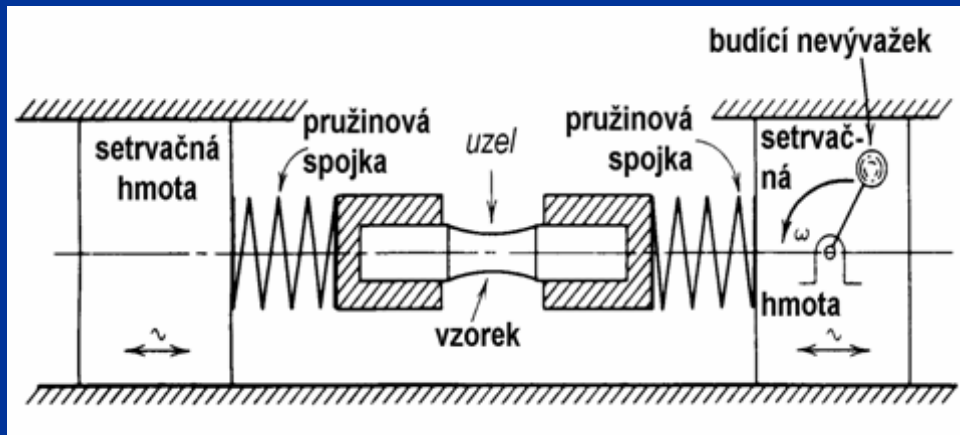
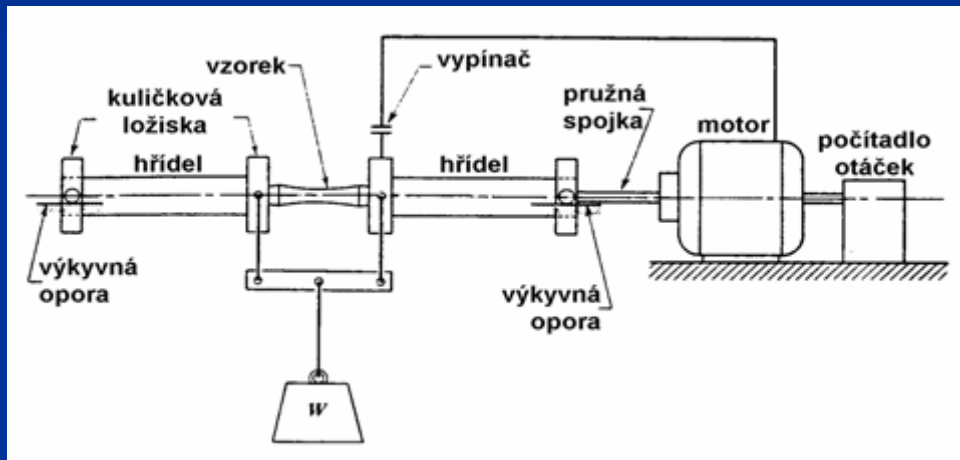
Parisův-Erdoganův vztah



Základní únavové zkoušky

Zkušební tělesa - stanovení křivky únavového života

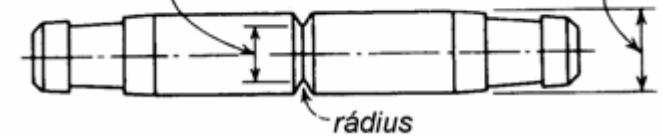
$$\sigma_a = \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right) A (N_f)^b$$



těleso pro zkoušku ohybem za rotace

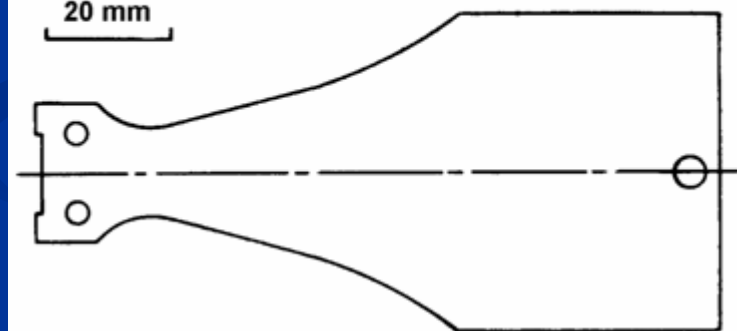
průměr 8,25 mm

průměr 12 mm

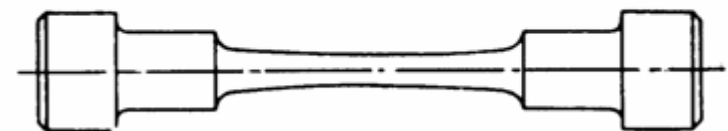


těleso s vrubem pro zkoušku ohybem za rotace

20 mm



konzolový vzorek



vzorek pro osové zatěžování

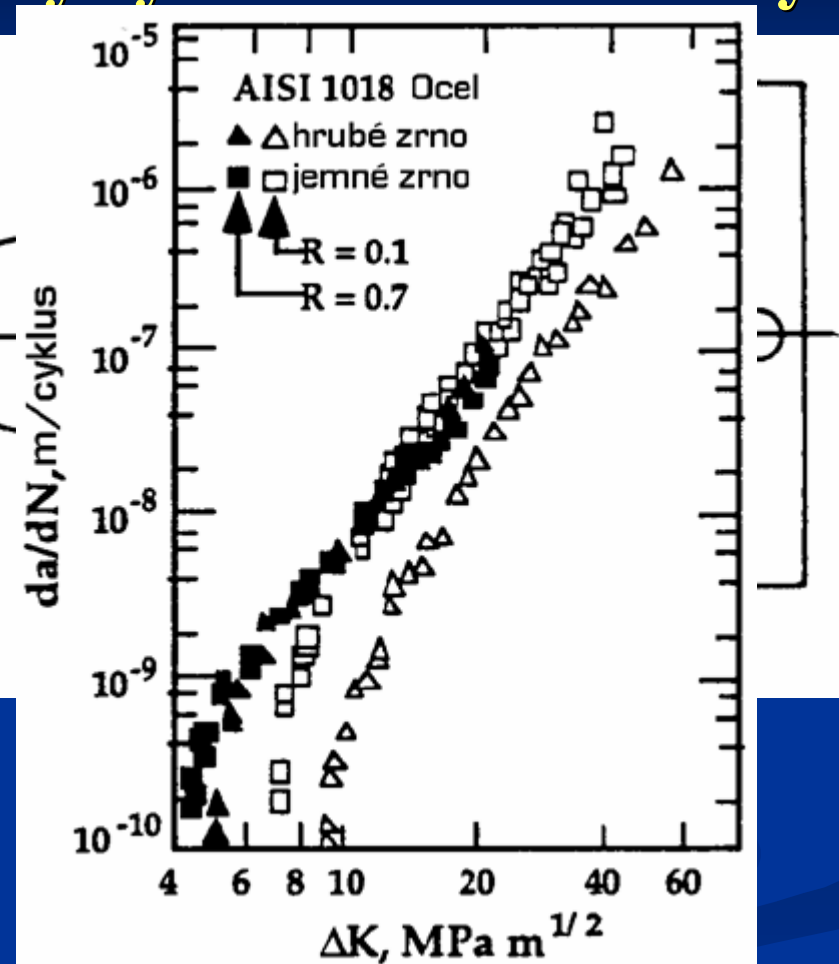
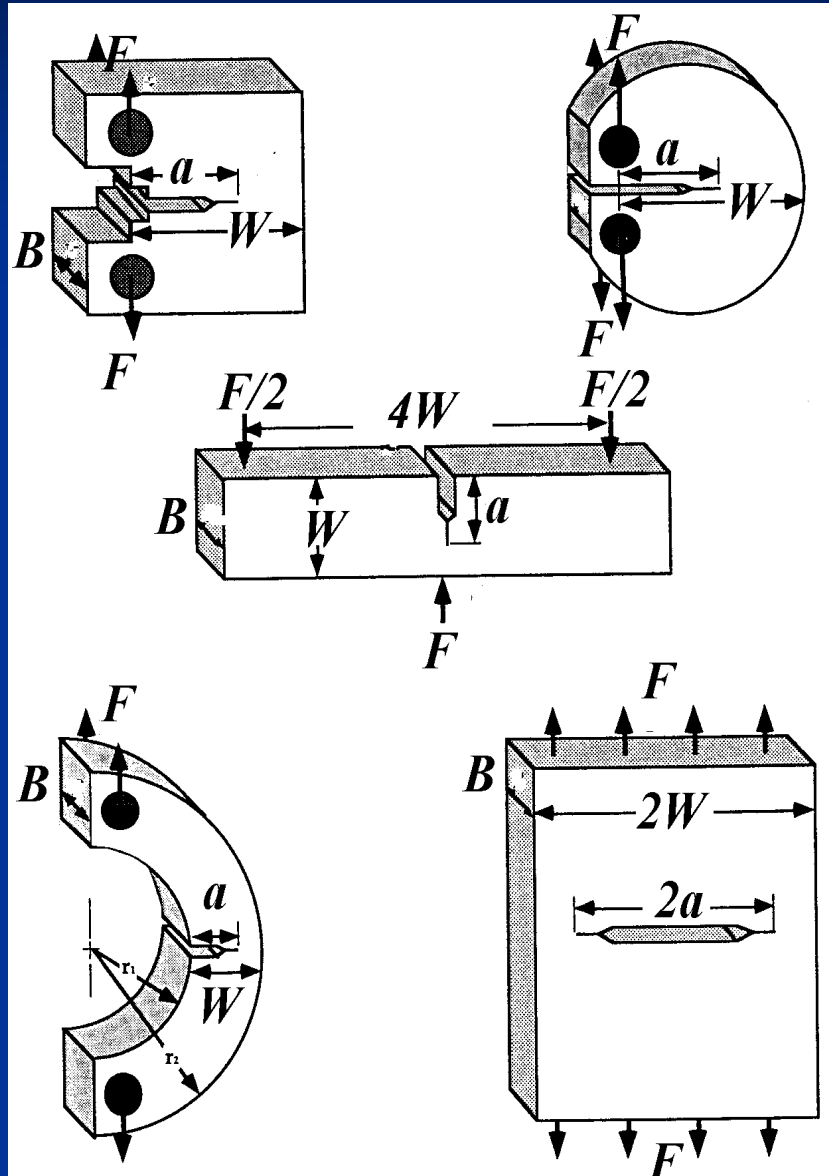
Základní únavové zkoušky

Elektromagnetické a mechanické buzení



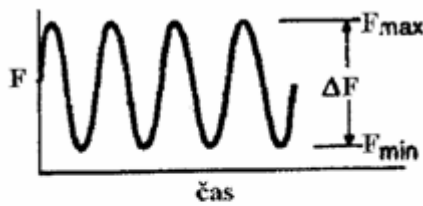
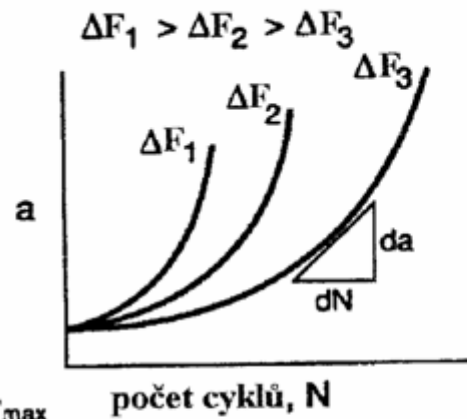
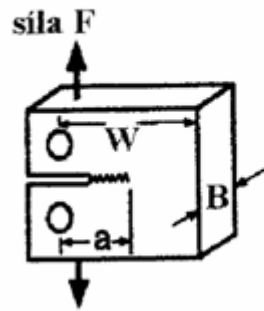
Základní únavové zkoušky

Zkušební tělesa - stanovení křivky rychlosti šíření trhliny



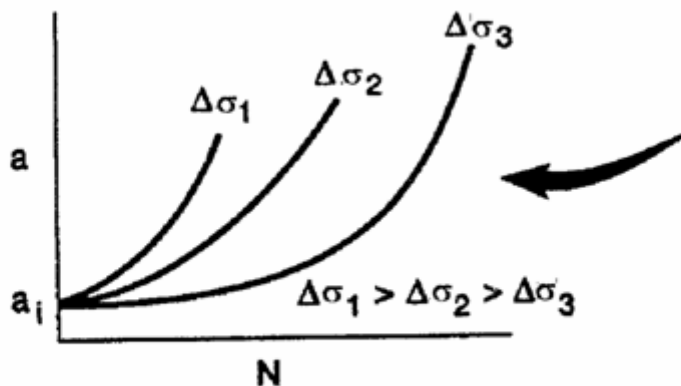
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m$$

Základní únavové zkoušky



Laboratorní zkoušky

$$\Delta K = \frac{\Delta F}{B\sqrt{W}} g(a/W)$$



$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

Aplikace

- použití dat

Křivka únavového života

Vliv:

$$\sigma_a = \left(1 - \frac{\sigma_m}{R_m}\right) A (N_f)^b$$



vrubu



kvality povrchu (zpevnění, povlaky)



frekvence zatěžování



prostředí (koroze, zavírání trhliny)



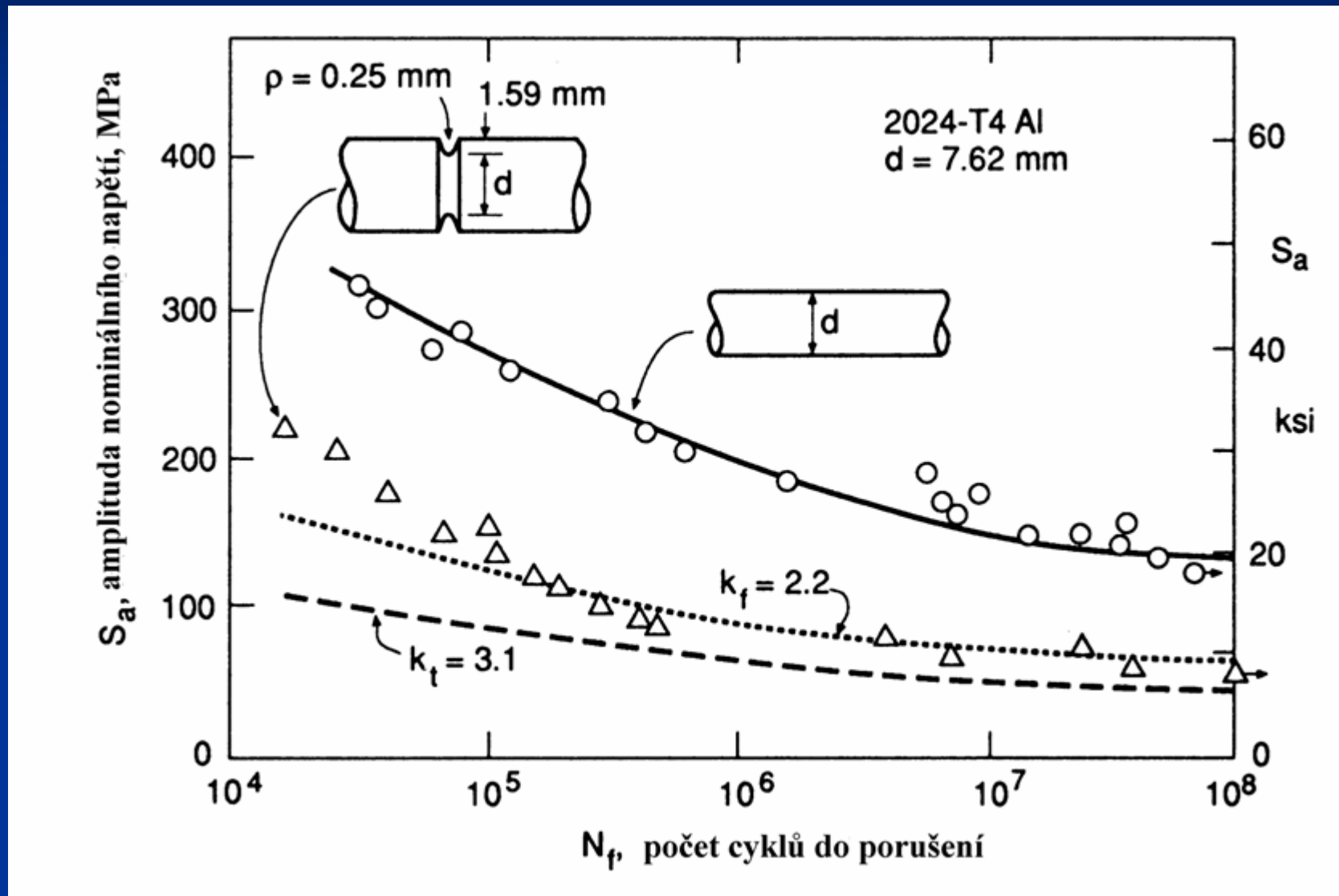
pevnosti



mikrostruktury a zbytkových napětí

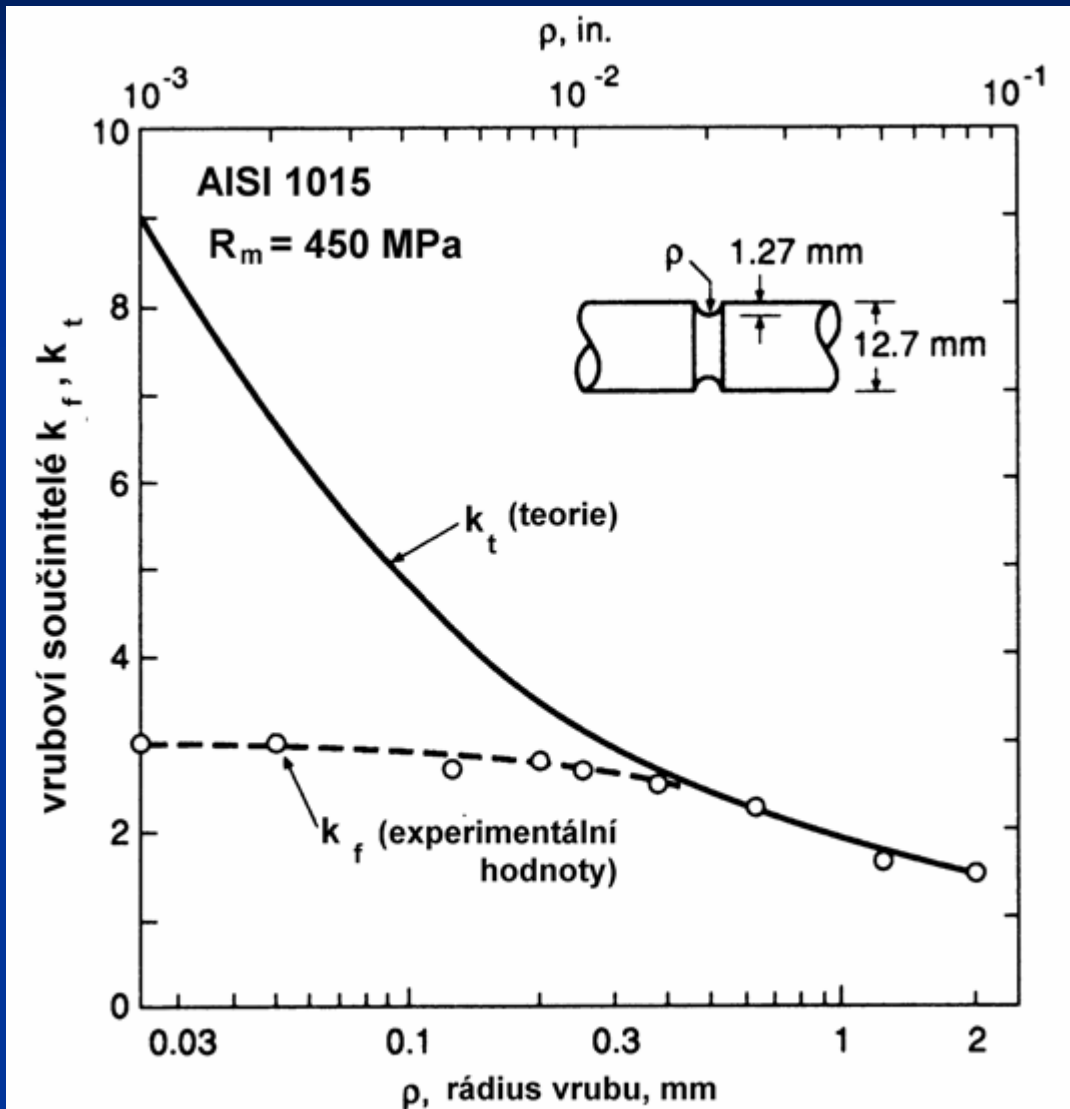
Křivka únavového života

Vliv vrubu na únavovou životnost



Křivka únavového života

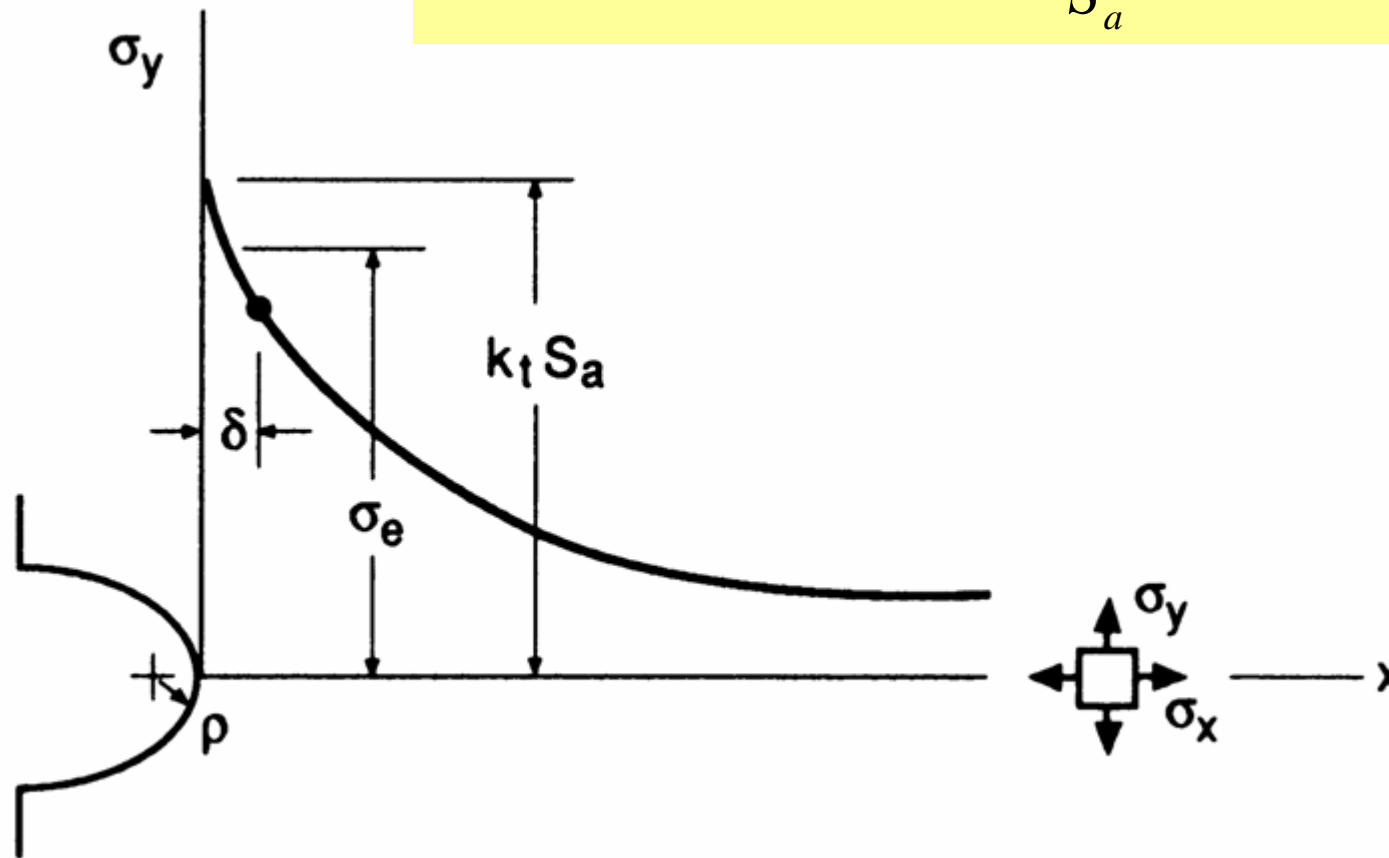
Vliv vrubu na únavovou životnost



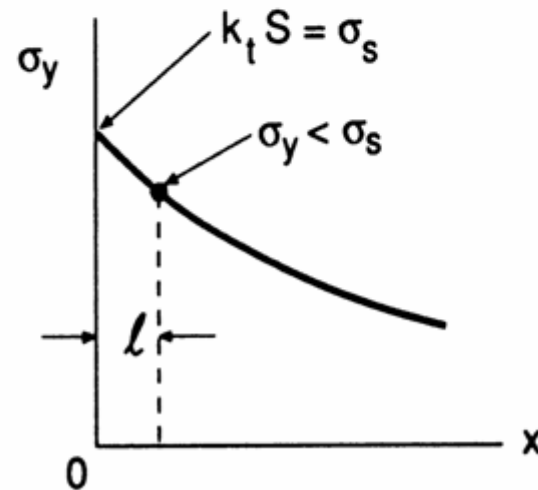
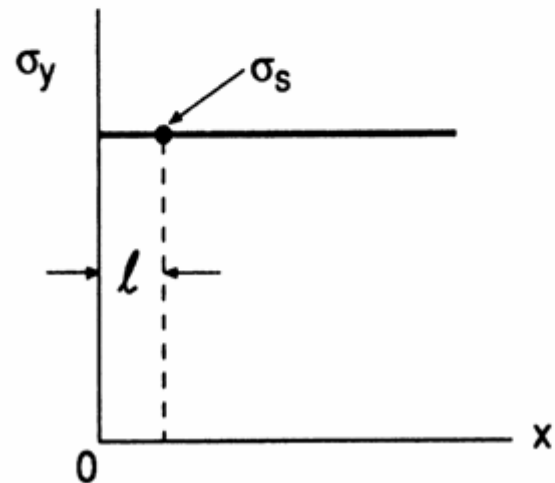
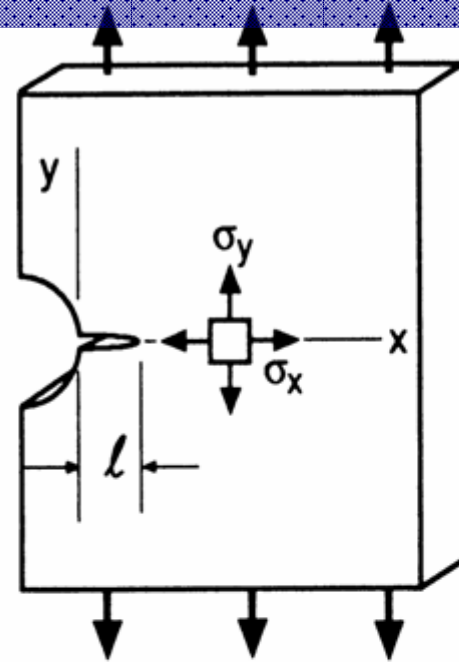
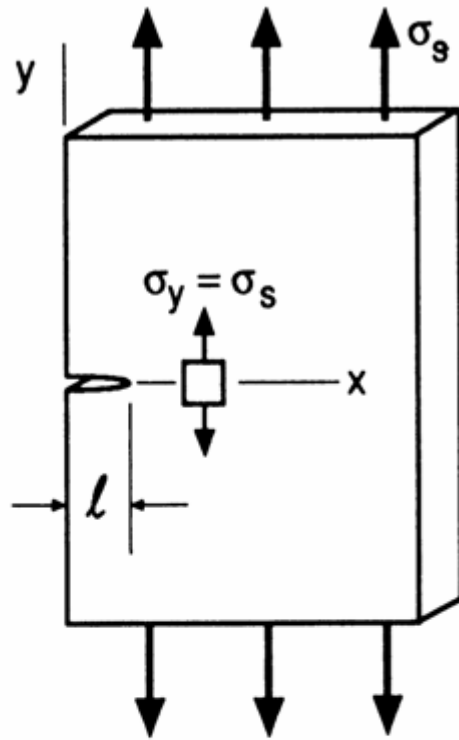
Křivka únavového života

Vliv vrubu na únavovou životnost – podmínky iniciace

$$k_f = \frac{(\text{střední hodnota } \sigma_y \text{ v intervalu } 0 < x < \delta)}{S_a} = \frac{\sigma_e}{S_a}$$



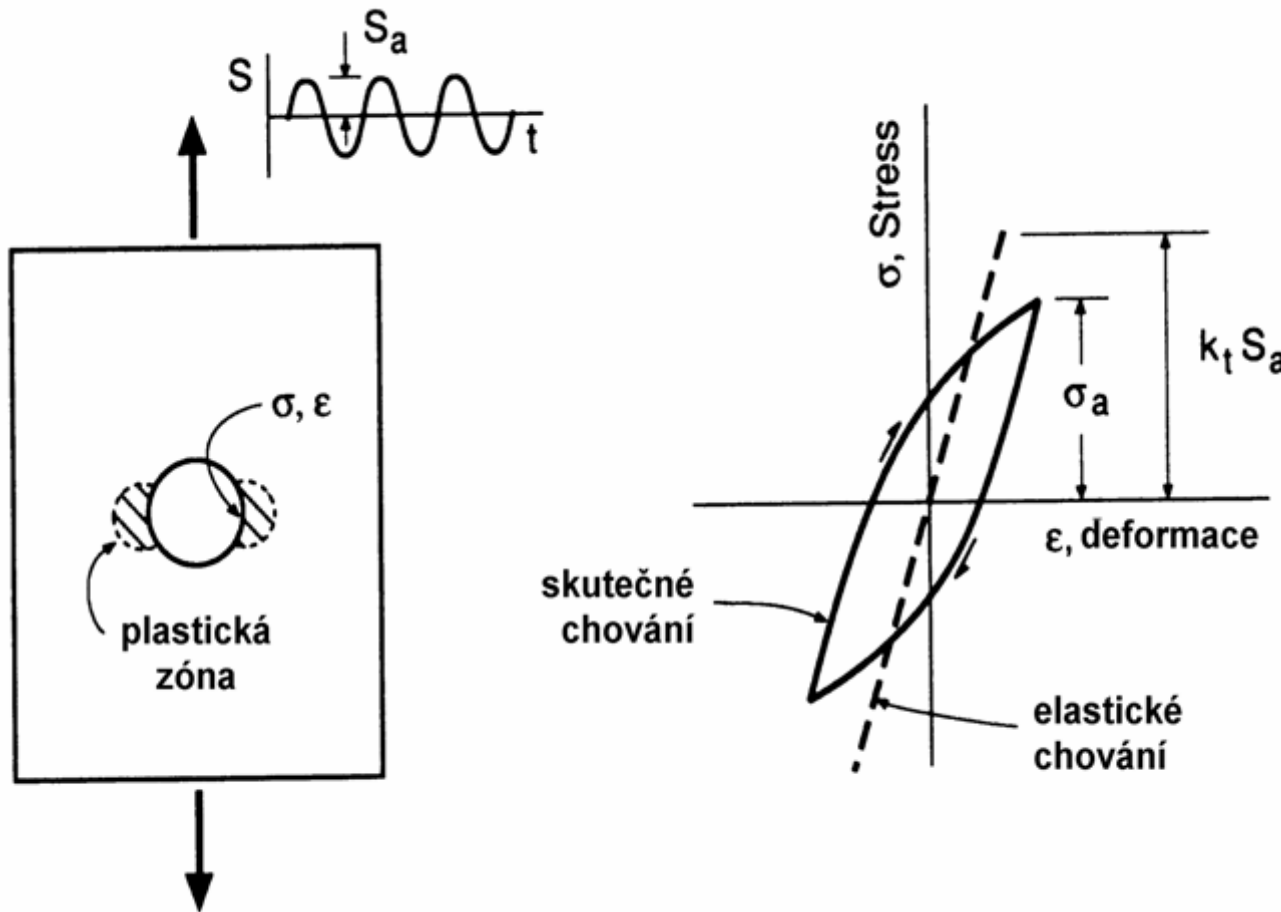
Křivka únavového života



Vliv vrubu
na podmínky
iniciace

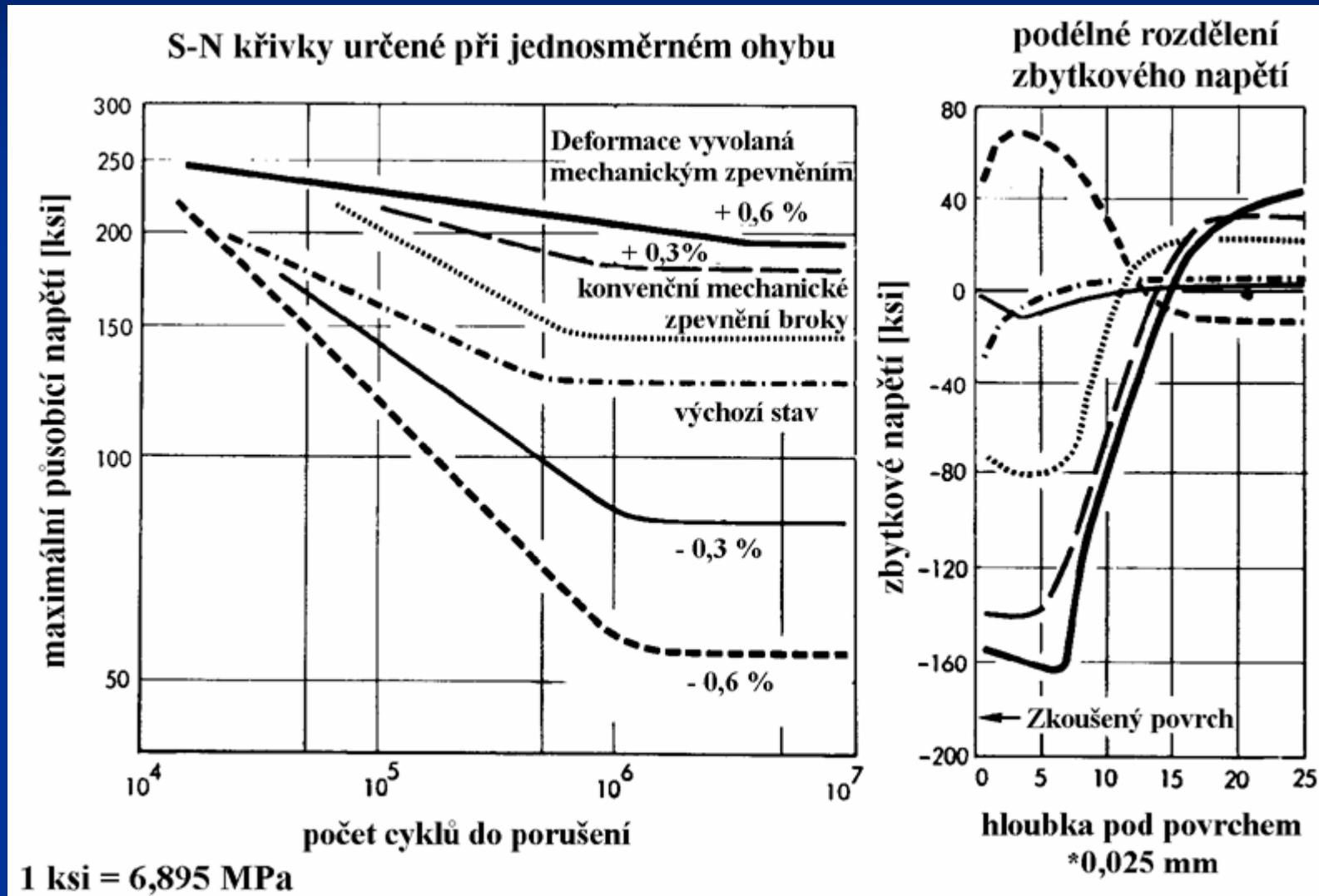
Křivka únavového života

Vliv vrubu na podmínky iniciace



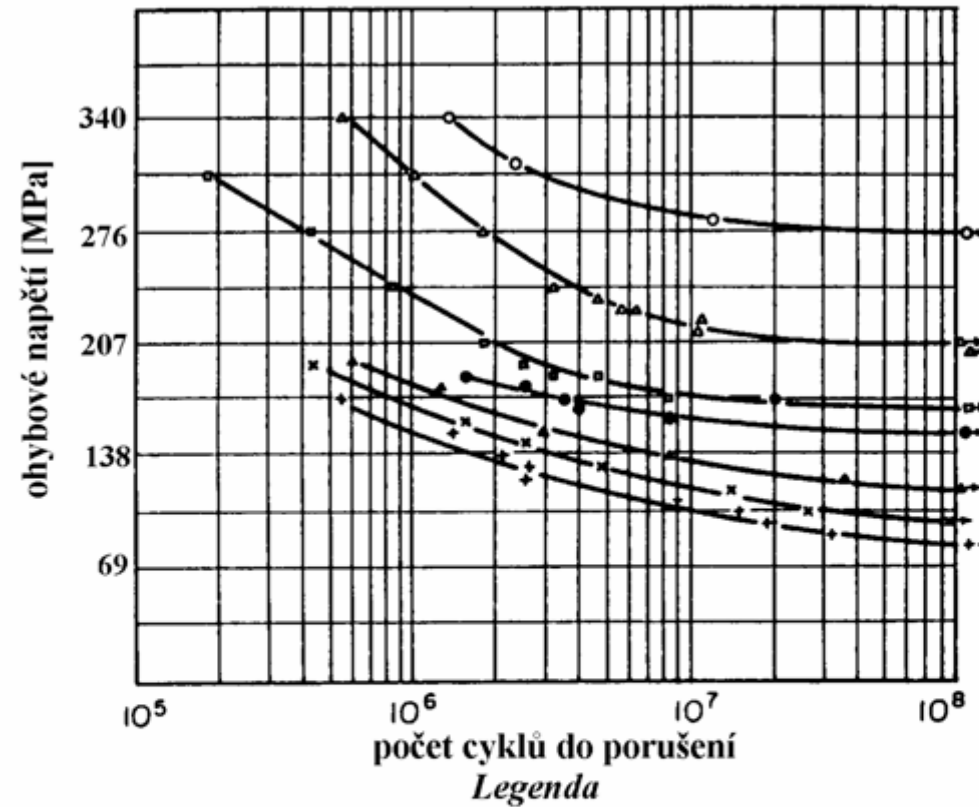
Křivka únavového života

Vliv kvality povrchu na únavovou životnost



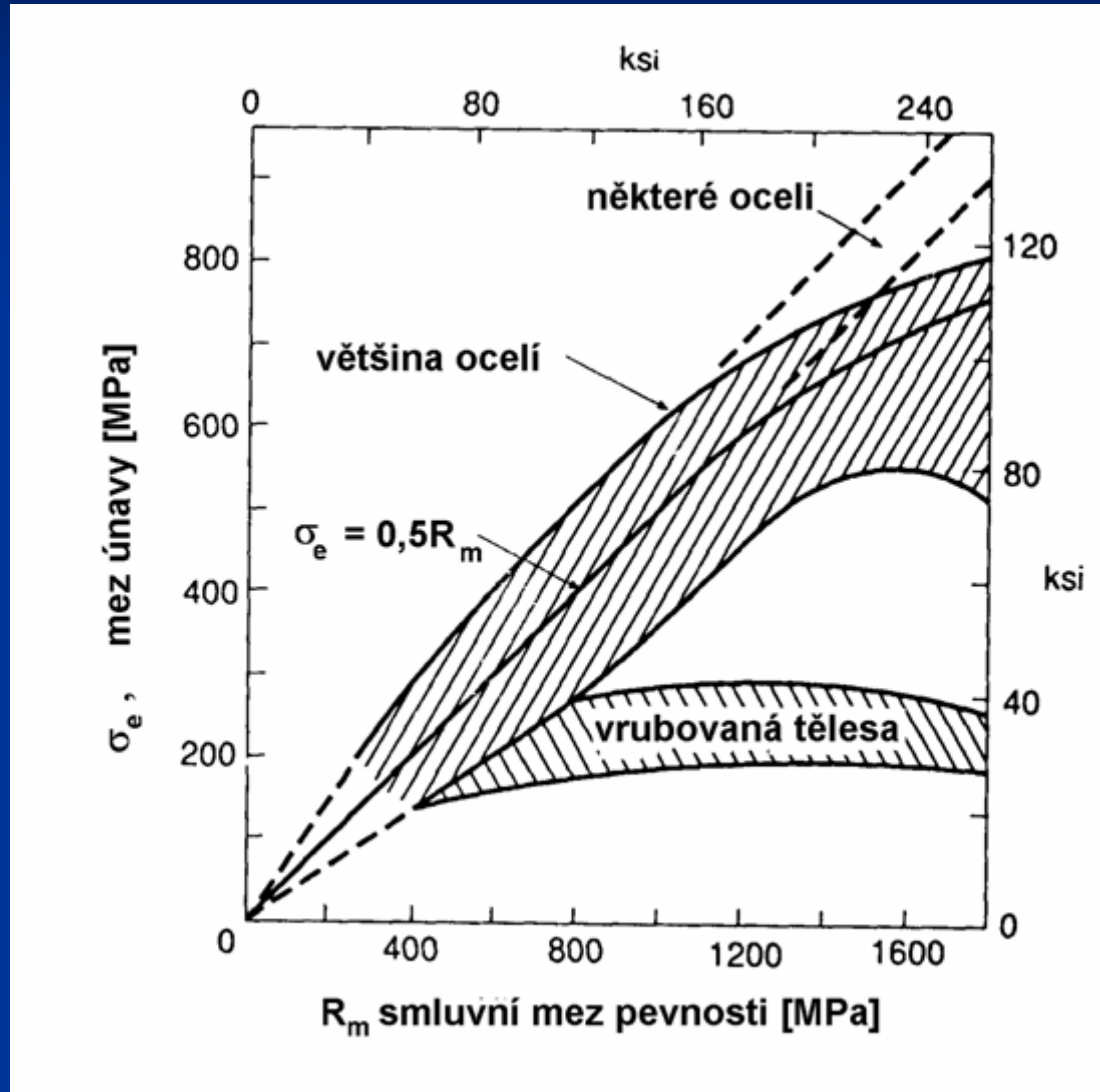
Křivka únavového života

Vliv mikrostruktury na únavovou životnost



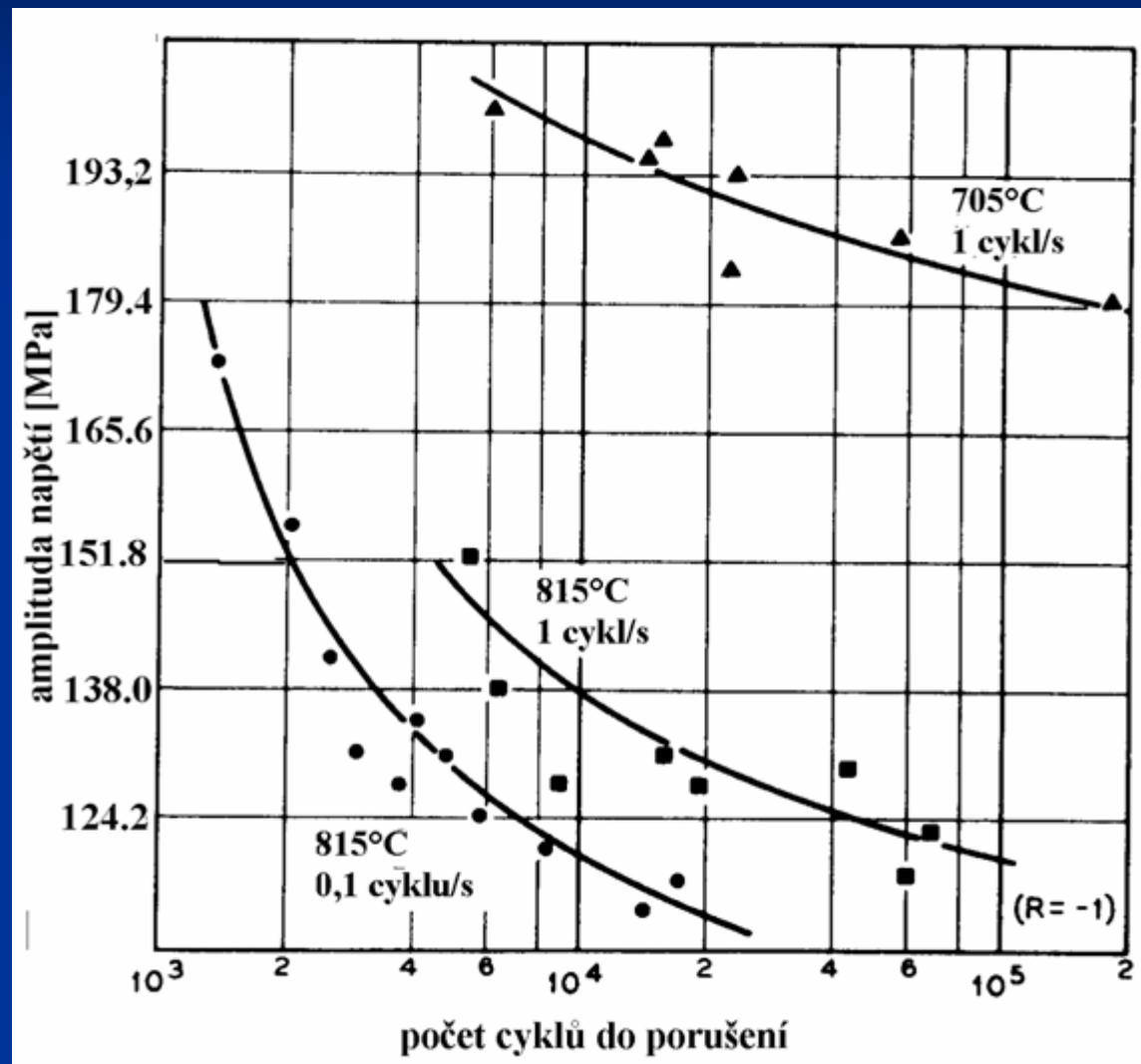
Křivka únavového života

Vliv pevnosti na únavovou životnost



Křivka únavového života

Vliv frekvence zatěžování na únavovou životnost



Křivka únavového života

Vliv prostředí na únavovou životnost

