

Dynamická únosnost a životnost

Přednášky

Milan Růžička, Jan Papuga

Přednášky
část 1
Základy únavové pevnosti

Milan Růžička

Podklady ke studiu

Úložiště <http://www.kmp.tul.cz/content/interaktivni-studijni-materialy>

- přednáškové podklady
- podklady pro cvičení

Doporučená literatura

- Jágrová, J., Čapek, L.: Dynamická únosnost a životnost, skripta TUL FS, 2013
- Růžička, M.-Hanke.M.-Rost M.: Dynamická pevnost a životnost. skripta ČVUT v Praze, 2. vyd., 1992.
- Růžička,M, Fidranský J. : Pevnost a životnost letadel, skripta ČVUT v Praze, 2000 (mechanika.fsid.cvut.cz)
- Haibach,E.: Betriebsfestigkeit. 3.Auflage., Springer, 2006.
- Schijve, J.: Fatigue of Structures and Materials. Springer, 2009.
- Radaj,D.- Vormwald,M: Advanced Methods of Fatigue Assessment. Springer, 2013
- Radaj.D.- Sonsino, M.C. – Fricke, W.: Fatigue assessment of welded joints by local approaches. CEC Press, Cambridge, 2006.
- Lee, Y. – Pan J. – Hathaway, R.B. – Barkey, M.E.: Fatigue testing and analysis. Elsevier, 2005.

Co je to mezní stav konstrukce?

Ztráta schopnosti konstrukce plnit funkci, pro kterou byla určena.



Mezní stavy konstrukce

M.S. pevnosti

- Statická pevnost (houž. lom)
- Plasticita, plast. přizpůsobení
- Stabilita, vzpěr
- **Křehký lom**
- Creep (lom při tečení)
- **Nízko-, vysokocyklová únava**
- Interakce únava+creep
- Teplotní šok

M.S. funkční způsobilosti

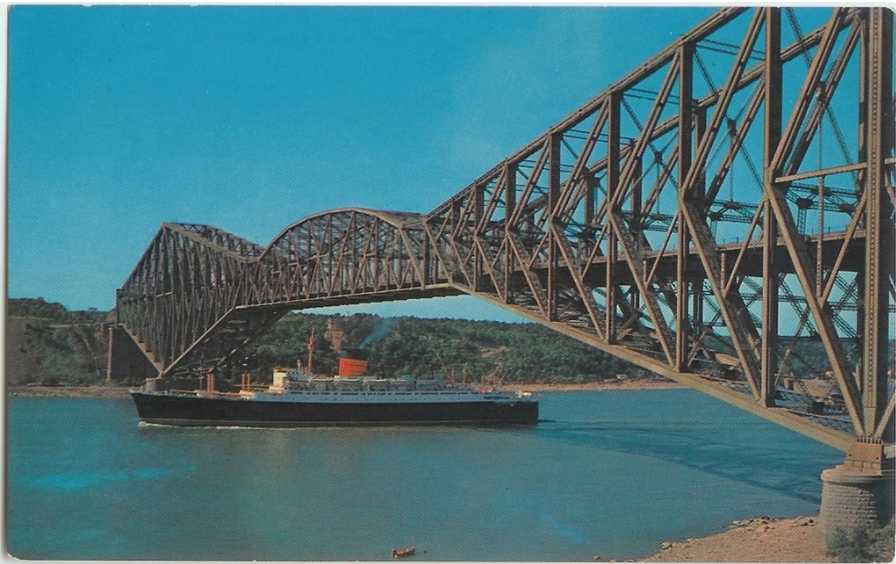
- Elastické a plastické deformace
- Poškození rázem
- Dynamická odezva
- Opotřebení
- Koroze

Interakce různých kombinací uvedených mezních stavů

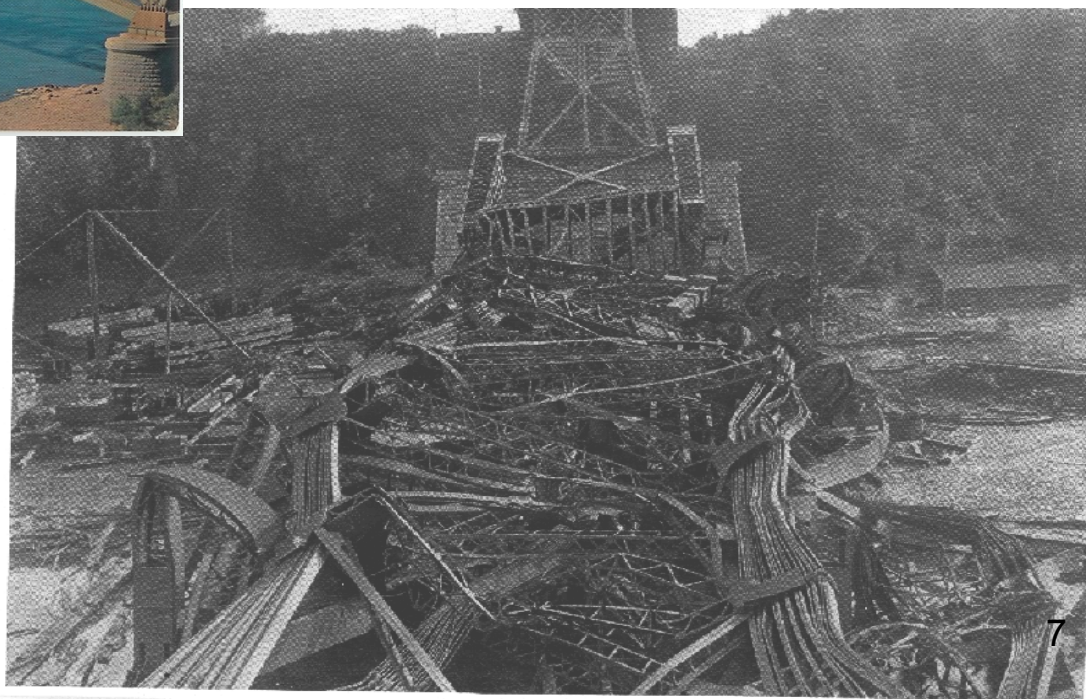
Plastické přetvoření



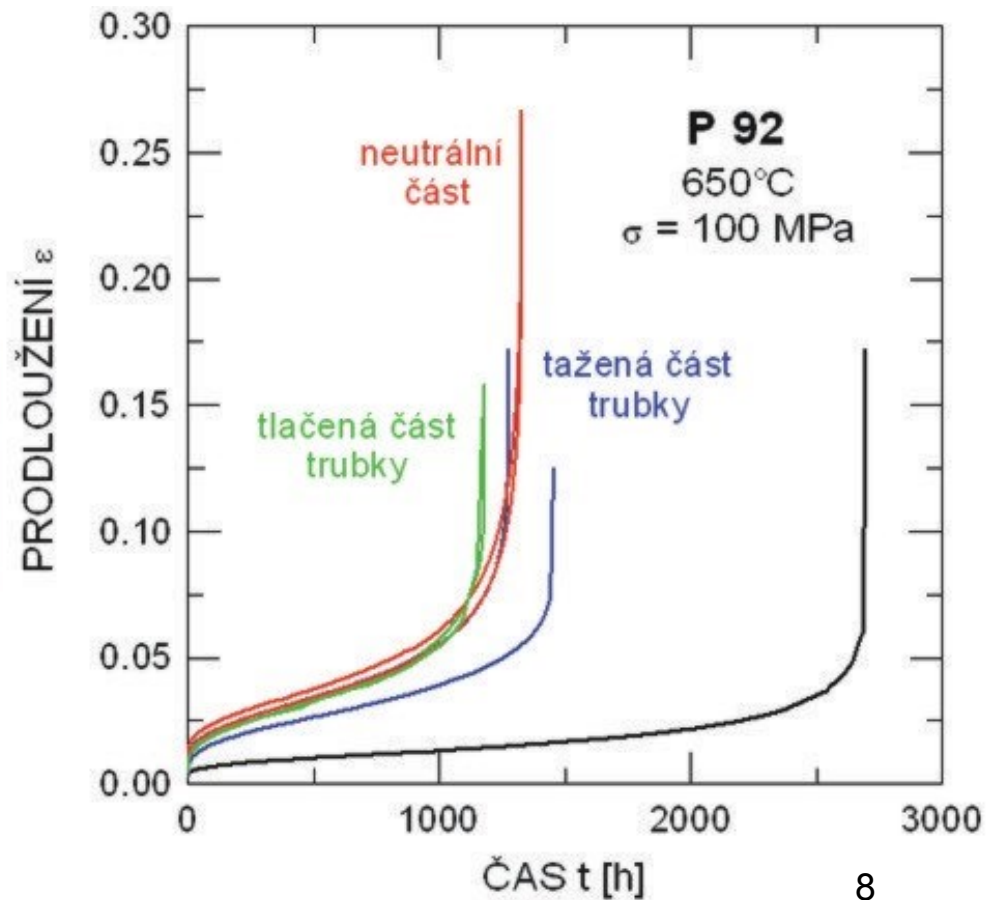
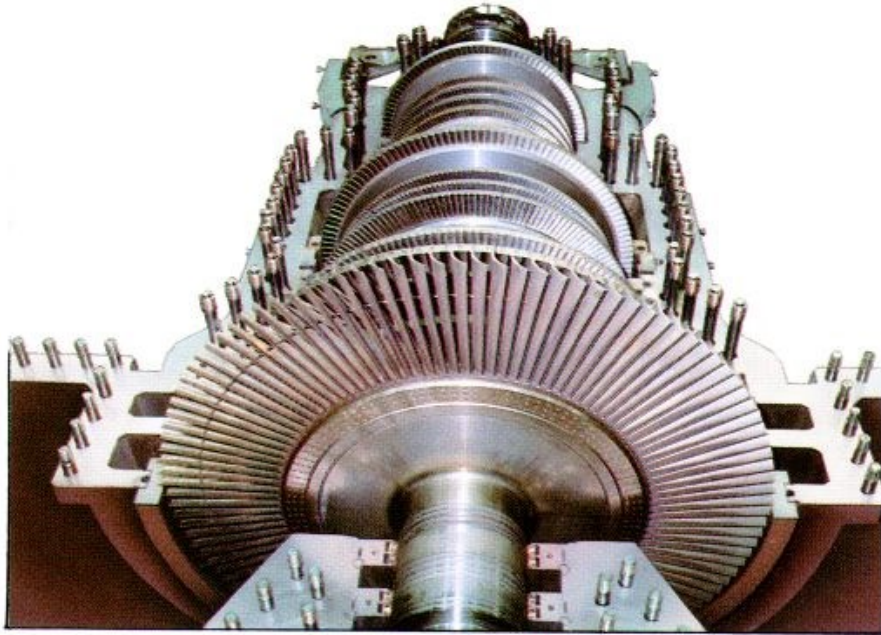
Stabilita



Kolaps mostu u
Quebecu 1907



Creep – tečení za zvýšené teploty

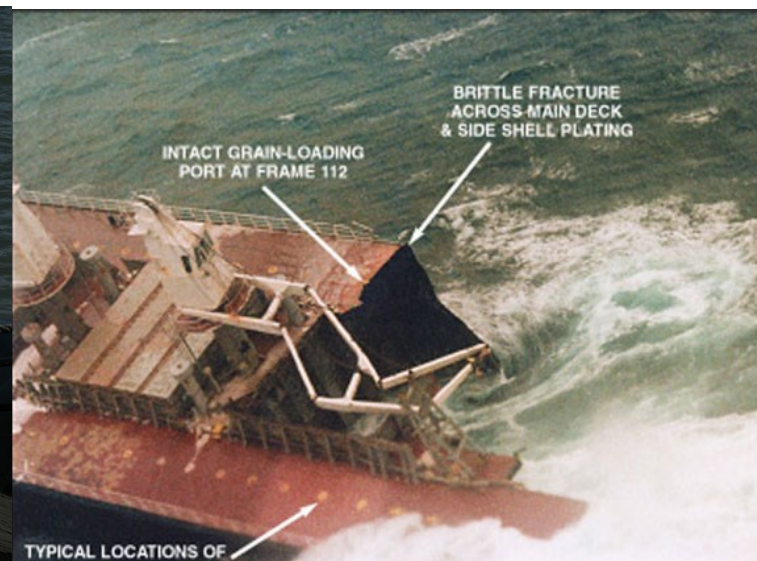


Dynamická odezva, rezonance

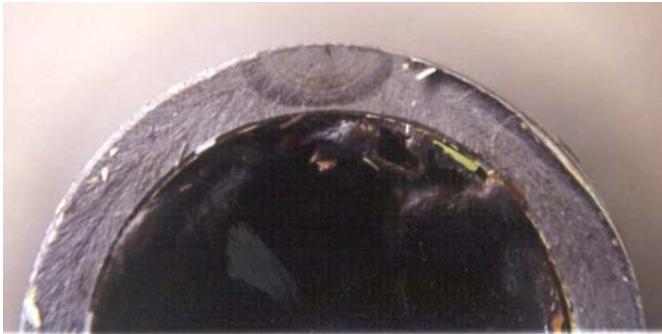


The Tacoma Narrows Bridge (1940, present day)
<https://www.youtube.com/watch?v=XggxeuFDaDU>

Křehký lom

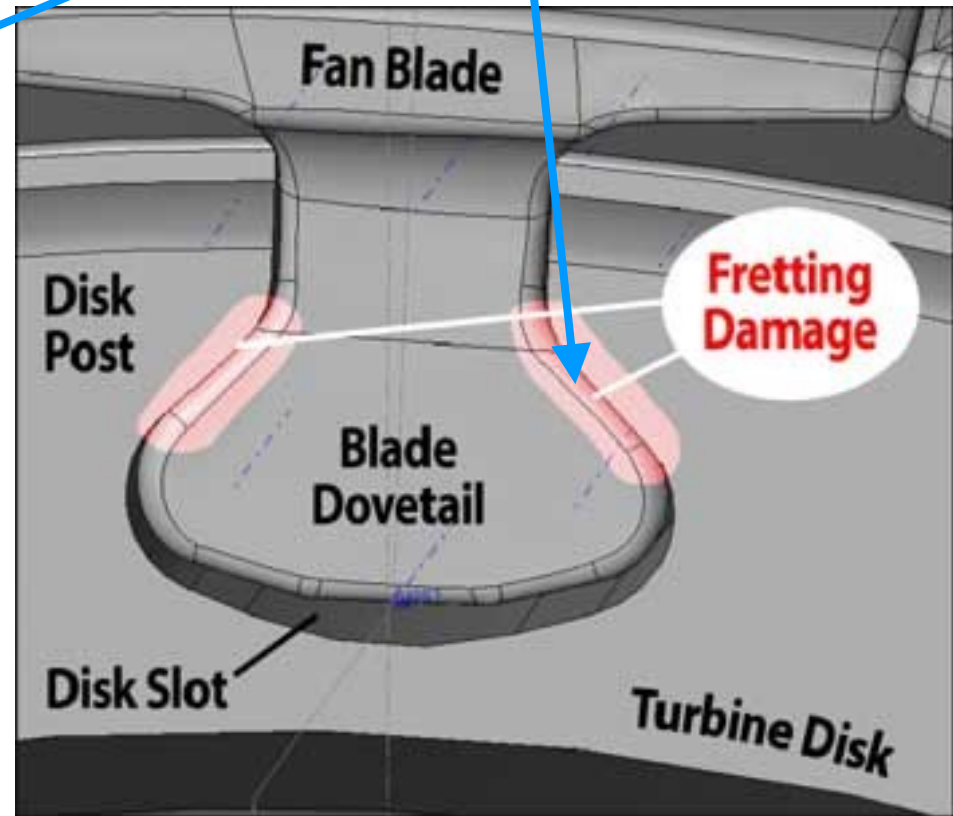
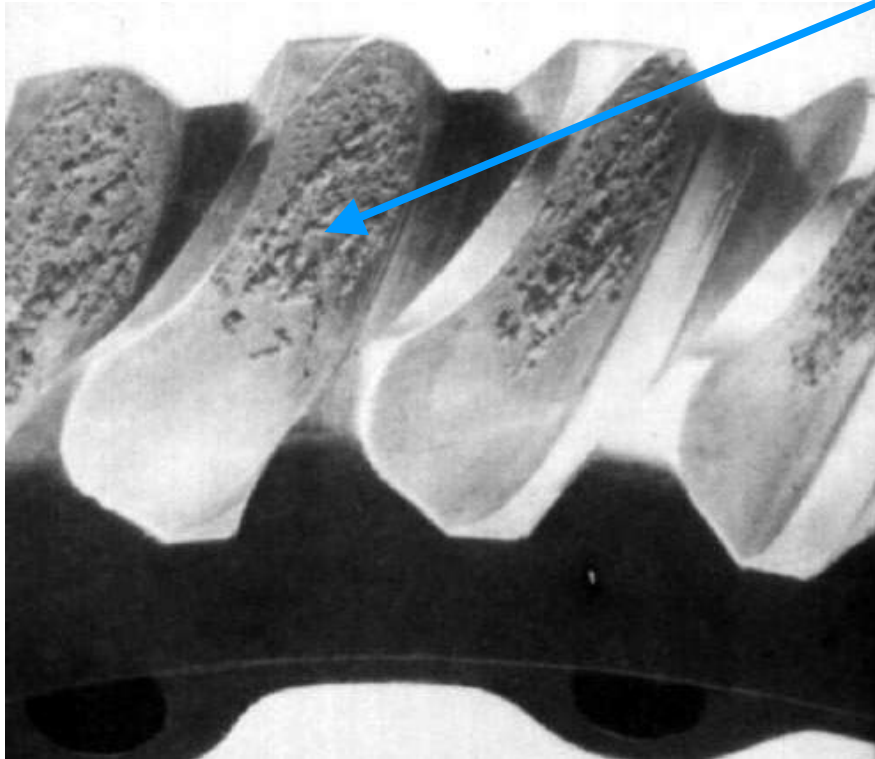


Únava (fatigue)



4-28-1988 After 89,090 flight cycles on a 737-200, metal fatigue lets the top go in flight.

Opotřebení a koroze (pitting, fretting)



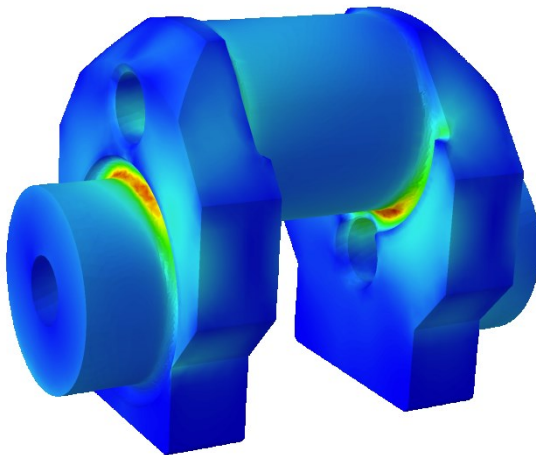
Teorie mezních stavů konstrukcí

Fyzika materiálů	Mechanika kontinua	Teorie pravděpodobnosti	Technologie, experiment
teorie dislokací fyzikální metalurgie iniciace trhlin	elasticita, plasticita statika, dynamika kmitání, rázy	náhodné procesy statistika teorie spolehlivosti	zprac. materiálu zkušebnictví teorie experimentu

Teorie mezních stavů – fáze aplikace

Apriorní (design)

- ❑ návrh konstrukce
- ❑ optimalizace
- ❑ návrh technologie
- ❑ omezení provozních podmínek



Aposteriorní (provoz)

- ❑ provozní inspekce
- ❑ **poruchy a havárie**

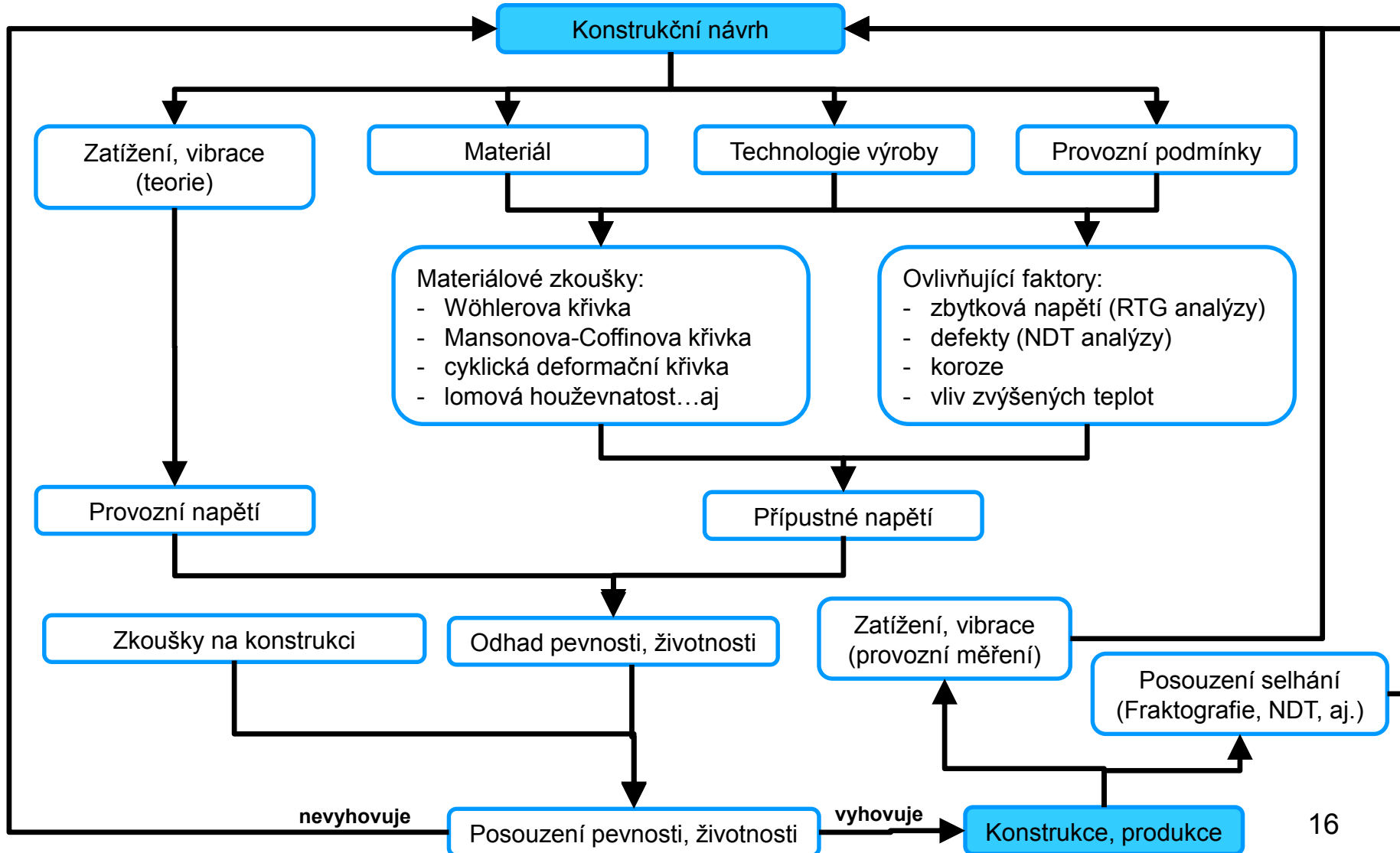


Únava materiálu

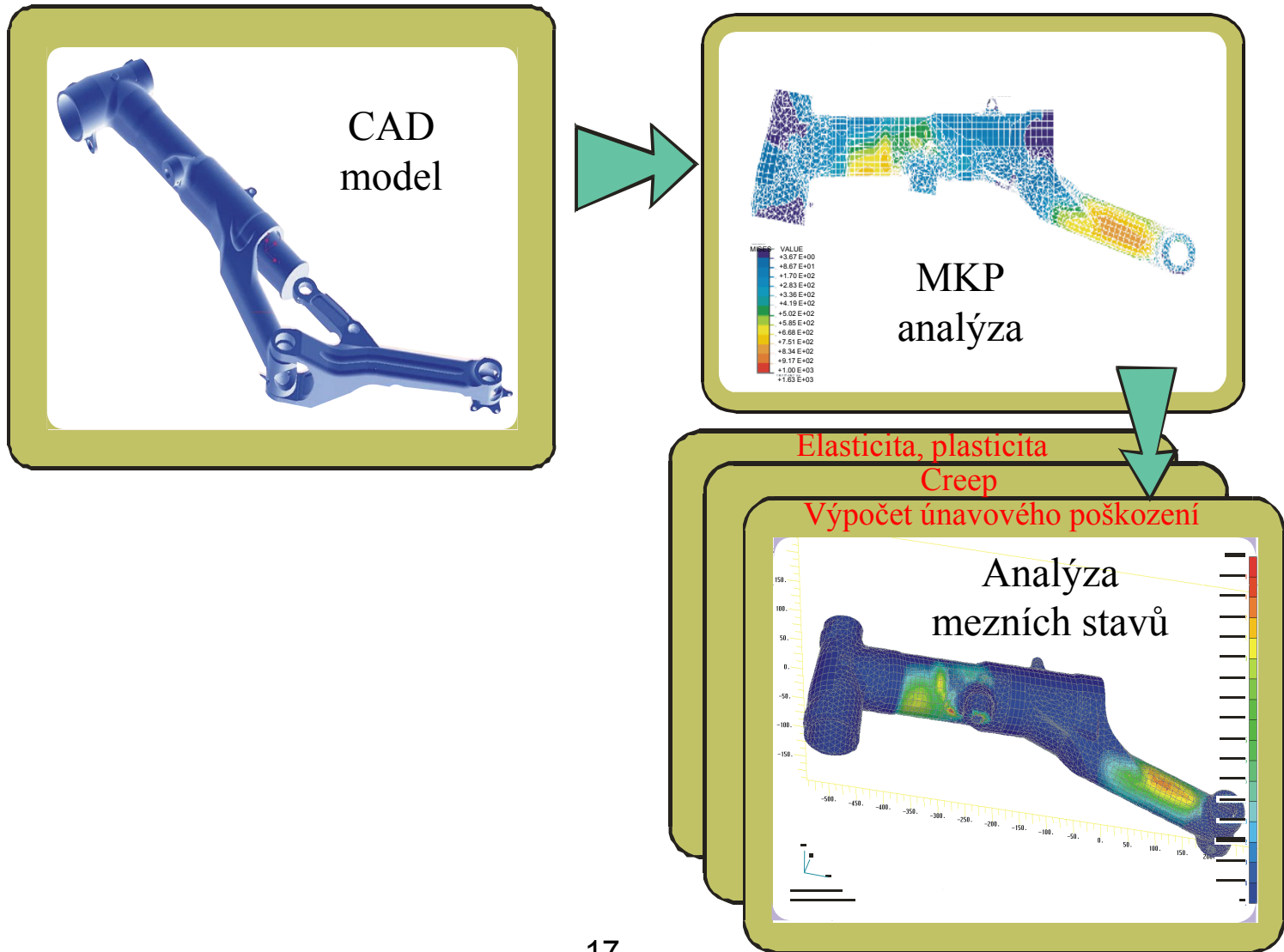
(fatigue, Ermüdung, усталость..)



Únava – schéma metodiky hodnocení



Počítačové modelování a numerické posouzení mezních stavů

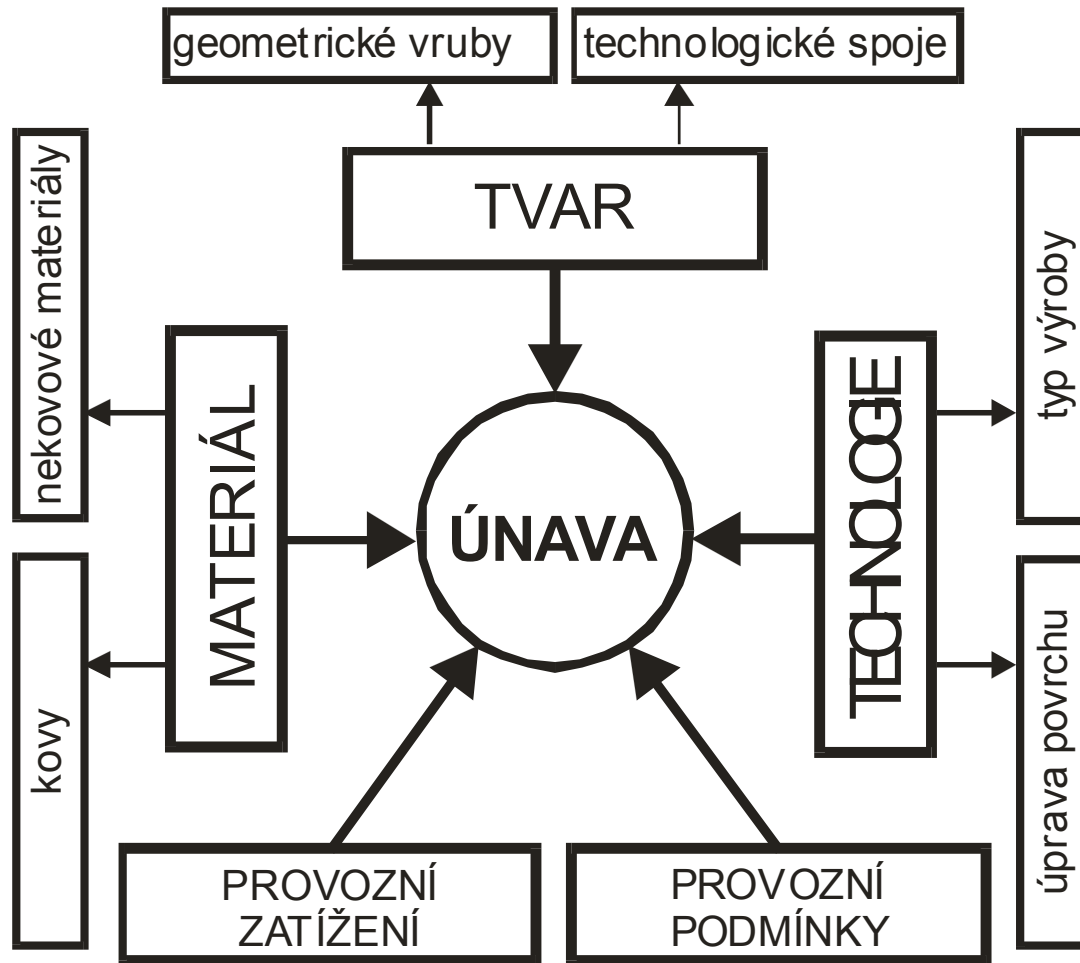


Metody predikce životnosti,

které poznáme

- Přístup pomocí nominálních napětí
(NSA - Nominal Stress Approach):
Vhodné použití pro analytické výpočty
- Přístup pomocí lokálních elastických napětí
(LESA - Local Elastic Stress Approach)
Vhodné použití pro lineární analýzy pomocí MKP
- Přístup pomocí lokálních elasto-plastických napětí a deformací
(LPSA - Local Plastic Stress and Strain Approach)
Vhodné použití pro elasto-plastické nelineární analýzy pomocí MKP
- Přístup využívající lomové mechaniky
(FMA - Fracture Mechanics Approach)
Vhodné použití pro analýzy pomocí lomové mechaniky

Hlavní faktory ovlivňující únavový proces



Charakteristiky harmonického cyklického namáhání

Harmonické zatěžování

amplituda napětí: $\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2}$

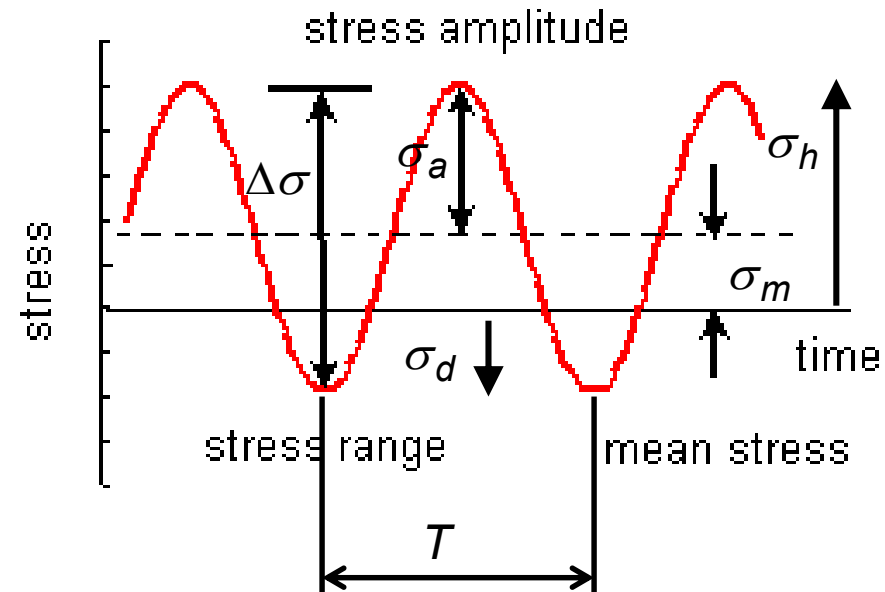
střední hodnota napětí: $\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2}$

rozkmít napětí: $\Delta\sigma = \sigma_h - \sigma_d$

koeficient nesouměrnosti: $R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h}$

perioda kmitu: T

frekvence kmitu: $f = \frac{1}{T}$



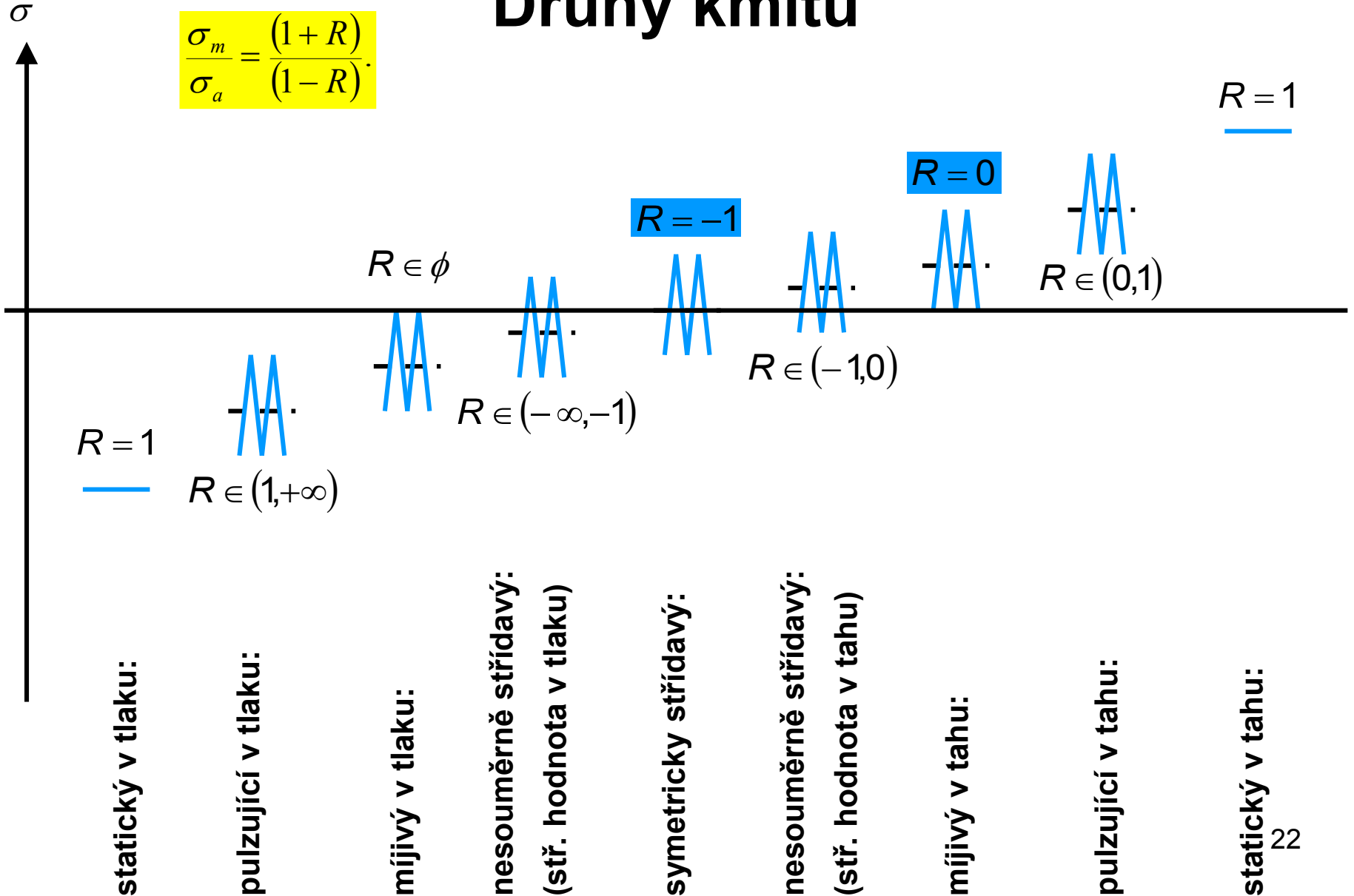
<http://fatiguecalculator.com>

napětově řízené zatěžování –
měkké

deformačně řízené zatěžování –
tvrdé

Druhy kmitů

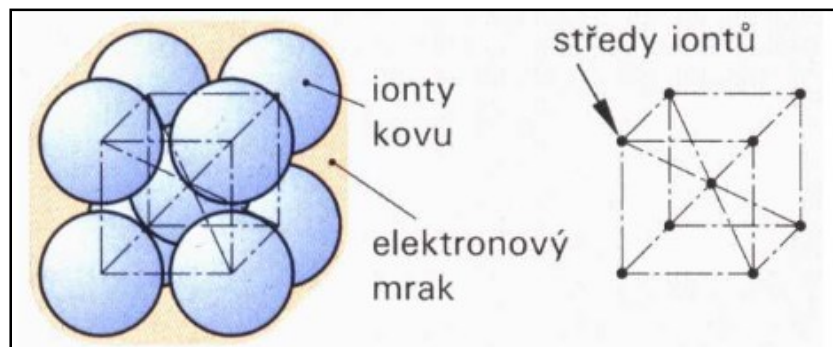
$$\frac{\sigma_m}{\sigma_a} = \frac{(1+R)}{(1-R)}$$



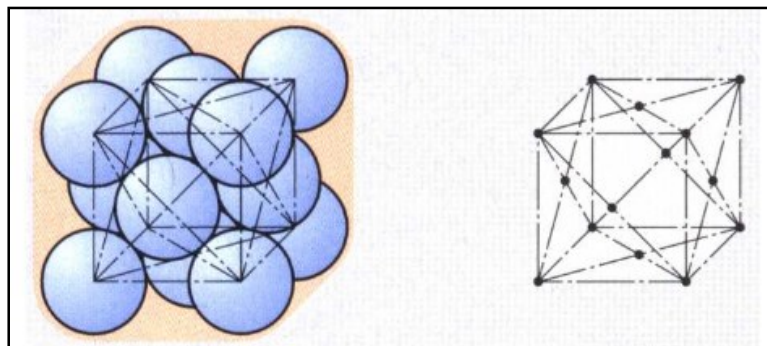
Pozadí fenoménu únavy



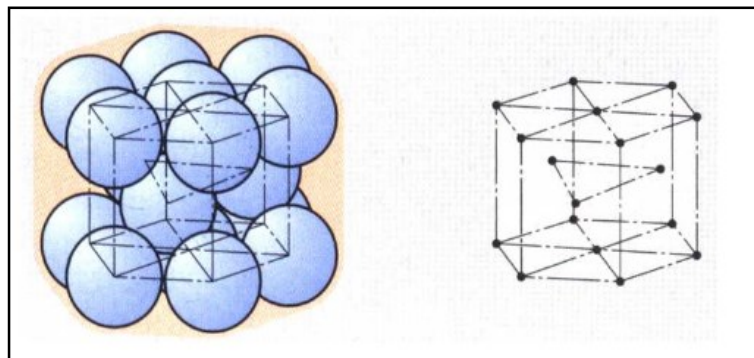
Krystalografické mřížky kovů



kubická prostorově centrovaná
(body centered cubic – BCC)
chrom, wolfram, vanad, železo α

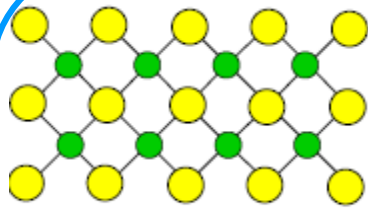


kubická plošně centrovaná
(face centered cubic – FCC)
železo γ , nikl, hliník, měď, olovo, zlato,
platina, stříbro

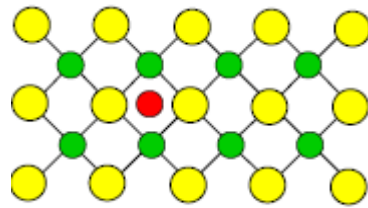


šesterečná
(hexagonal)
hořčík, zinek, titan

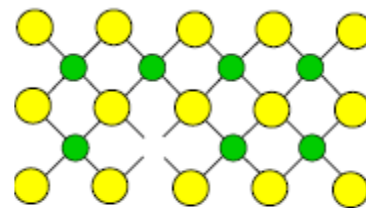
Krystalografická mřížka - poruchy



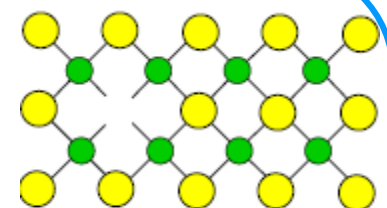
perfect lattice



interstitial impurity

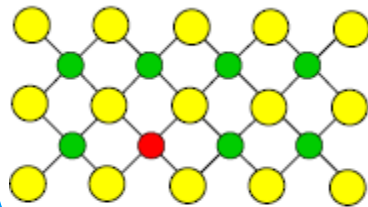


cation vacancy

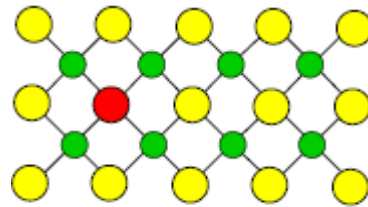


anion vacancy

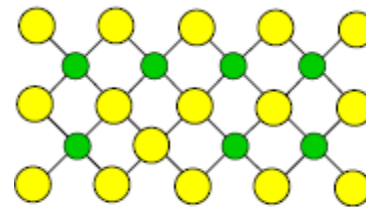
bodové poruchy



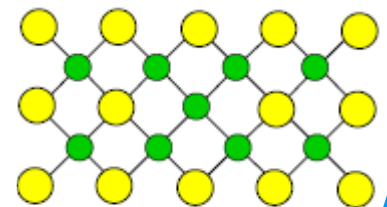
substitution of a cation



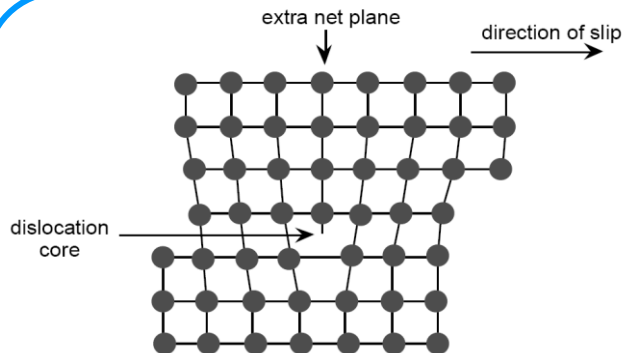
substitution of an anion



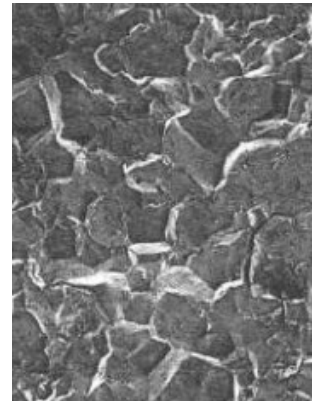
B_A antisite defect



A_B antisite defect

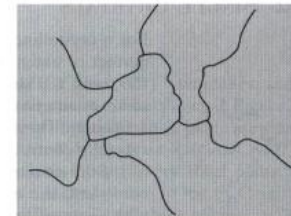
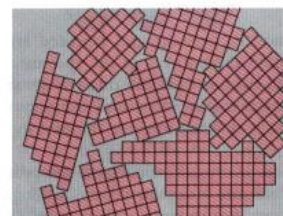
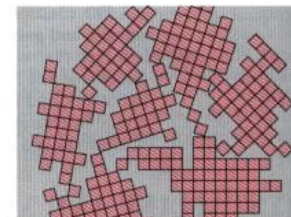
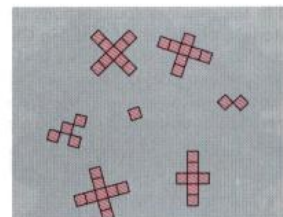
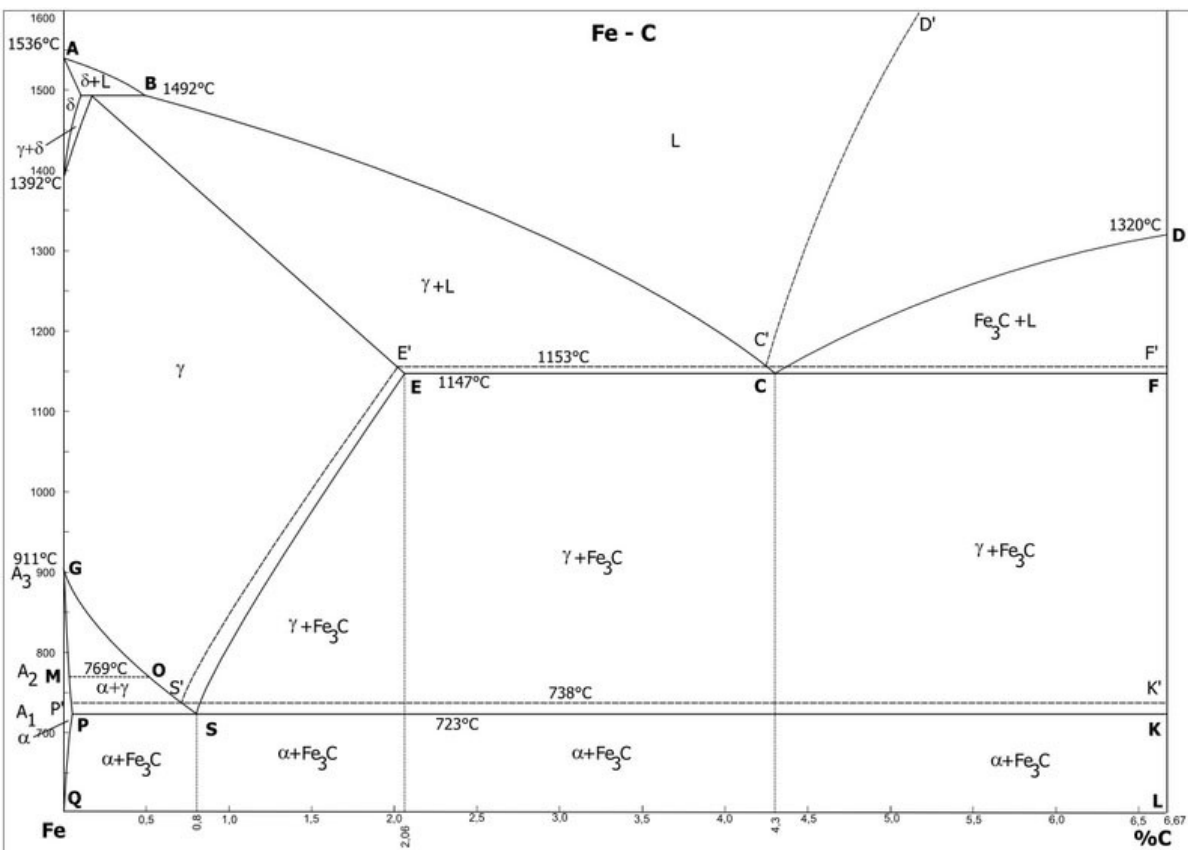


čárové poruchy - dislokace



plochové poruchy - zrna, hranice zrn

Technické slitiny železa



makroskopická isometrie
díky náhodné orientaci
anisotropních krystalů v tuhé
fázi

V každém materiálu jsou
poruchy ideální struktury

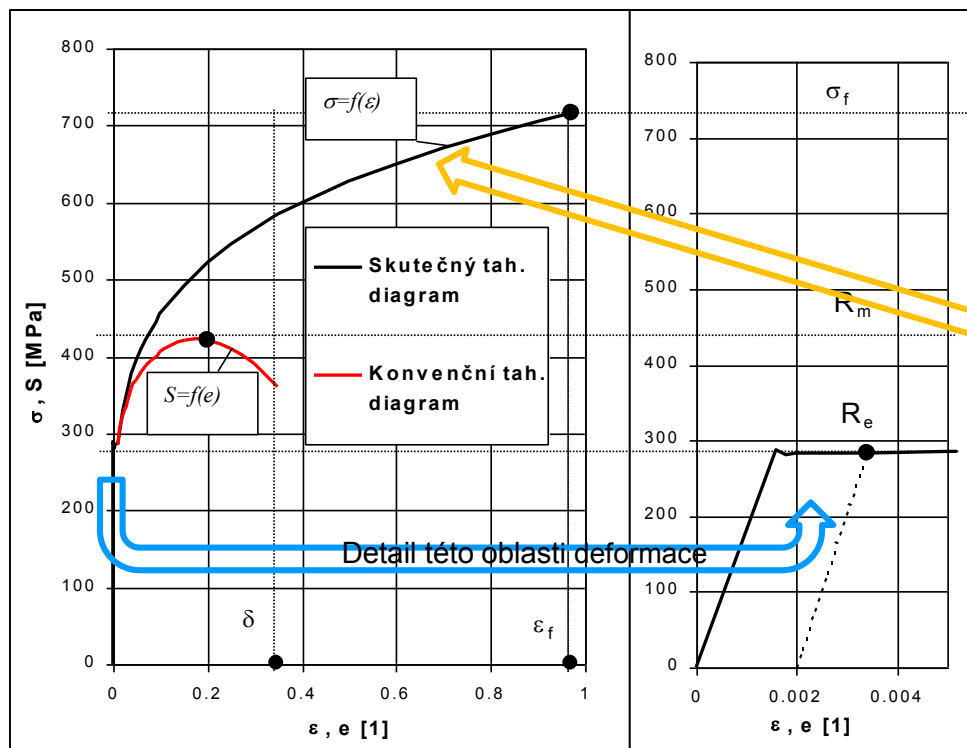
Vlastnosti materiálu při statickém zatěžování

Skutečný a smluvní tahový diagram

smluvní napětí (Lagrangeovo napětí) $S = F / A_0$, **poměrné prodloužení** měřené délky tyče $e = (l - l_0) / l_0$

Provedeme-li přepočet síly na okamžitý průřez:

skutečné napětí (Cauchyho napětí) $\sigma = F / A$ a **logaritmické prodloužení** $\varepsilon = \ln(l / l_0)$.



$$\sigma = \frac{F}{A} = S \frac{A_0}{A} = S \frac{l}{l_0} = S \left(1 + \frac{l - l_0}{l_0} \right) = S(1 + e)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{l - l_0}{l_0} \right) = \ln(1 + e)$$

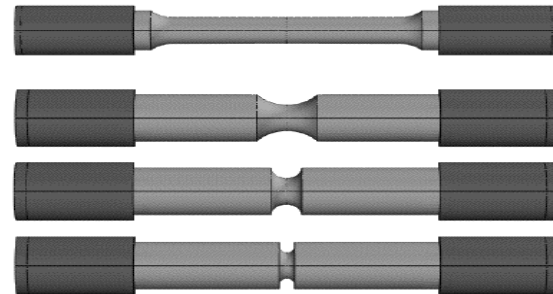
Aproximace v plastické oblasti

$$\sigma = K \cdot \varepsilon_p^n$$

K
 n

je modul monotónního zpevnění
je exponent monotónního zpevnění

Zkoušky materiálu



Hladké, nebo
vrubované vzorky
(různá koncentrace napětí),

Symetricky střídavé,
nebo mříživé zatěžování

Odkazy:

https://www.youtube.com/watch?v=LhUclxBUV_E

Cyklická deformační křivka

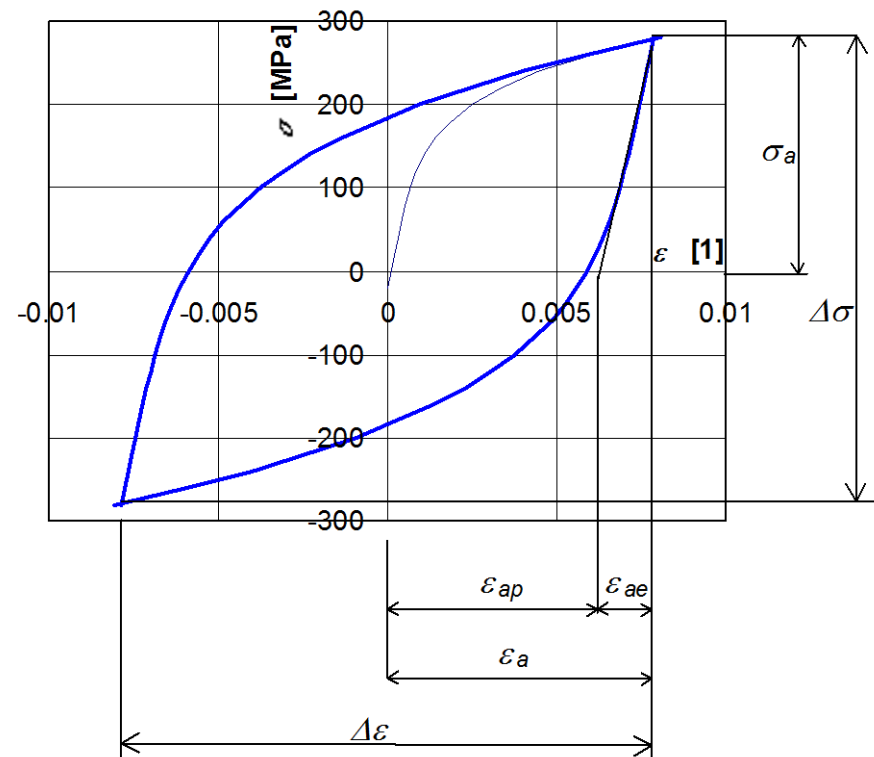
(cyclic stress-strain curve)

Vlastnosti materiálu při cyklickém zatěžování

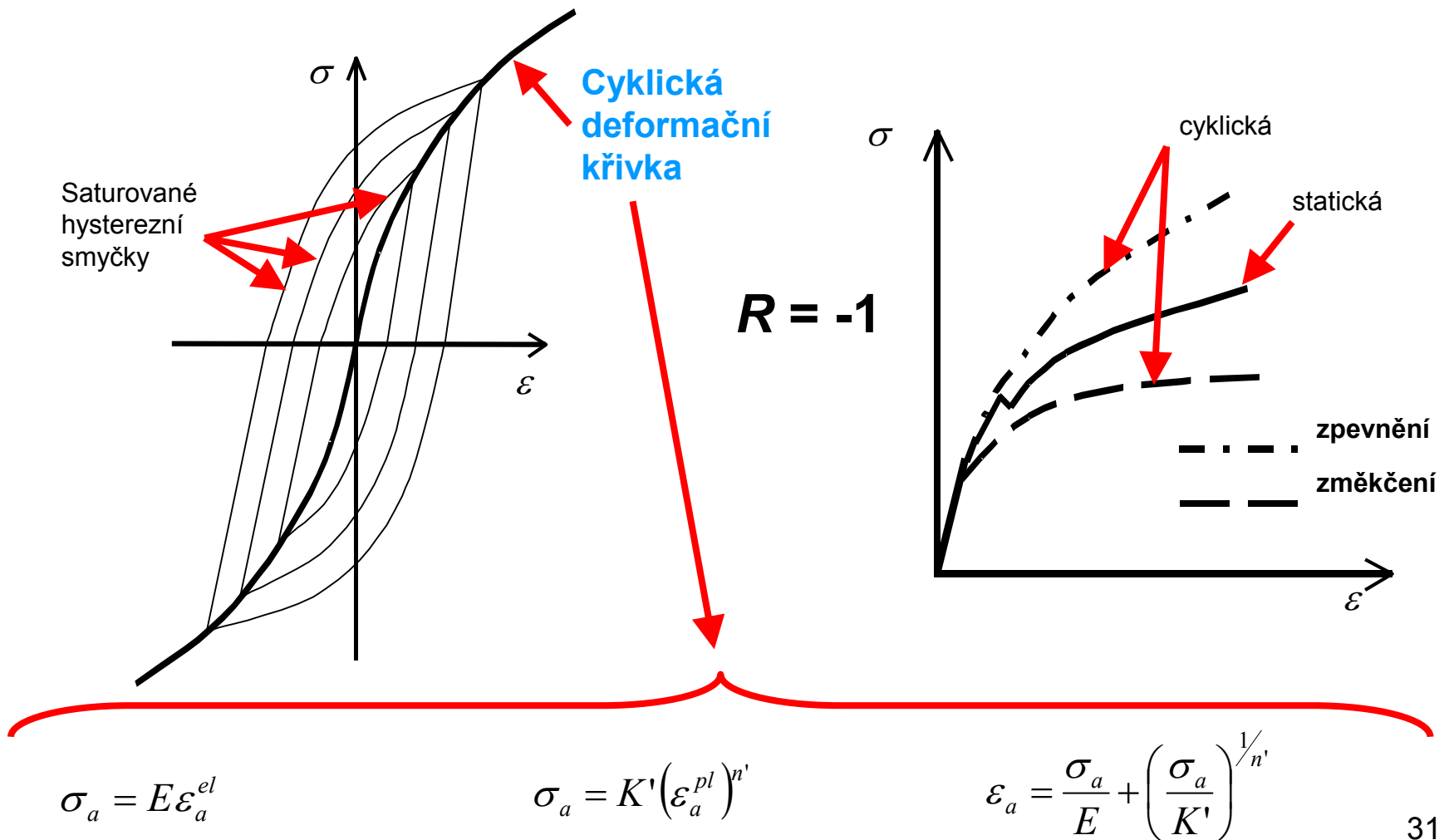
Hysterezní smyčka

Je třeba rozlišovat dva základní případy cyklického zatěžování vzorků:

- zatěžování s řízenou amplitudou napětí tzv. **měkké zatěžování**
- zatěžování s řízenou amplitudou poměrné deformace, tzv. **tvrdé zatěžování**.



Hysterezní smyčky, cyklická deformační křivka, aproximace

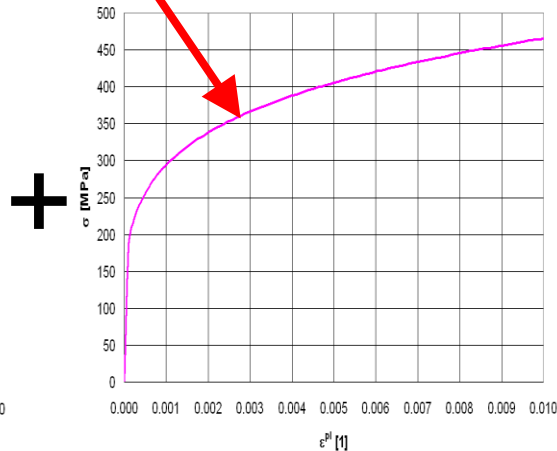
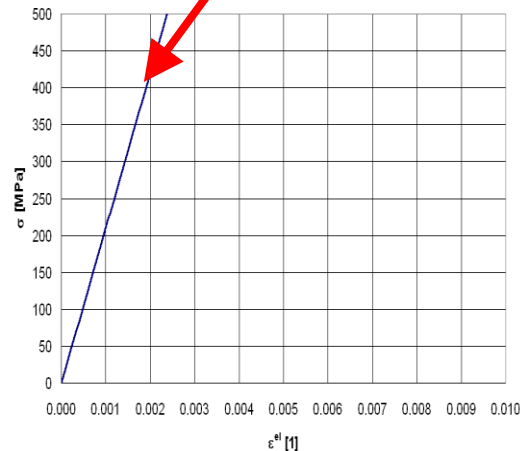


Rambergova-Osgoodova aproximace

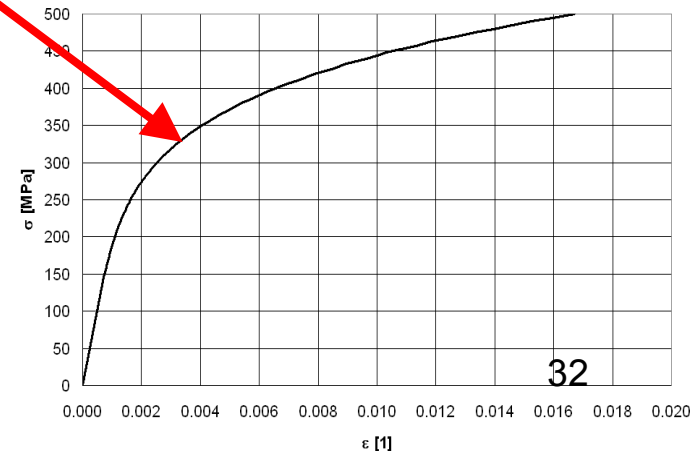
(užívaná pro přibližné vyjádření skutečného tahového diagramu i cyklické deformační křivky)

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E \varepsilon^{el} \\ \varepsilon^{el} &= \frac{\sigma}{E} \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} \sigma &= K (\varepsilon^{pl})^n \\ \varepsilon^{pl} &= \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n} \end{aligned} \right\}$$

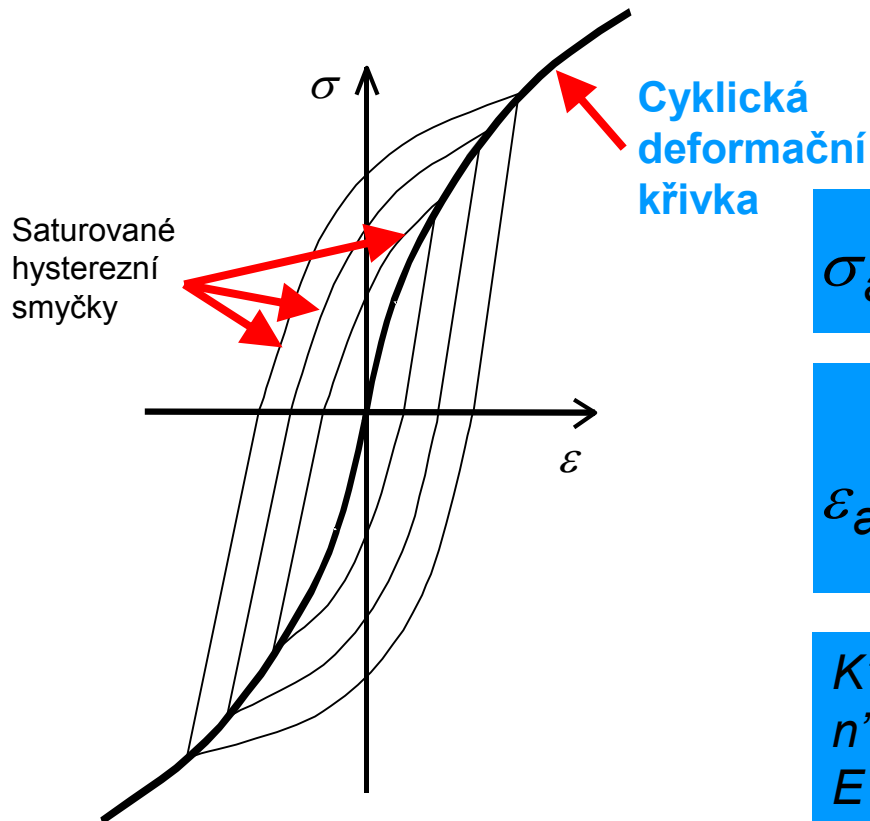
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n} \quad \text{Ramberg - Osgood}$$



=



Rambergova-Osgoodova aproximace



$$\sigma_a = K' (\varepsilon_a^{pl})^{n'}$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_a^{el} + \varepsilon_a^{pl} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}$$

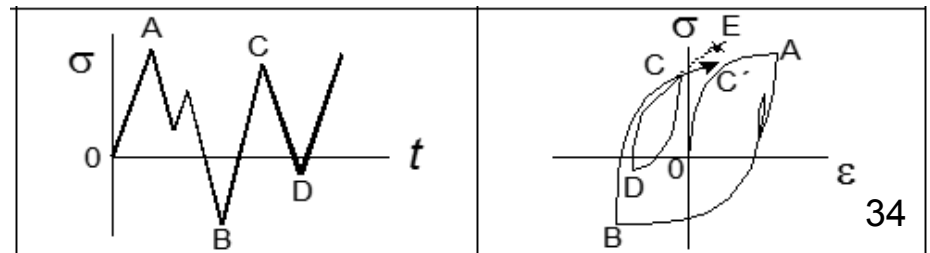
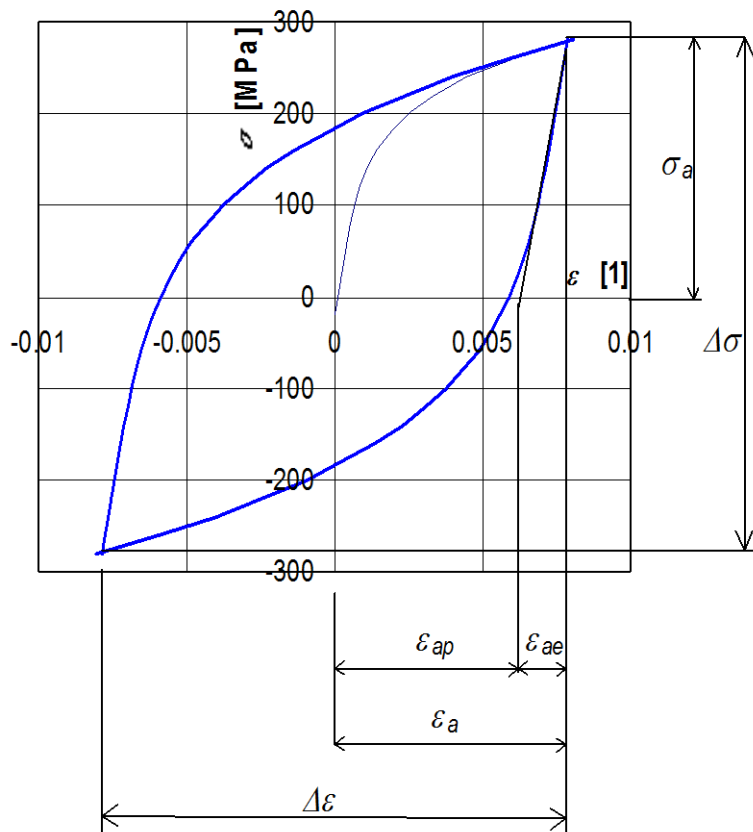
K' - modul cyklického zpevnění
 n' - exponent cyklického zpevnění
 E - modul pružnosti v tahu

Saturovaná hysterezní smyčka

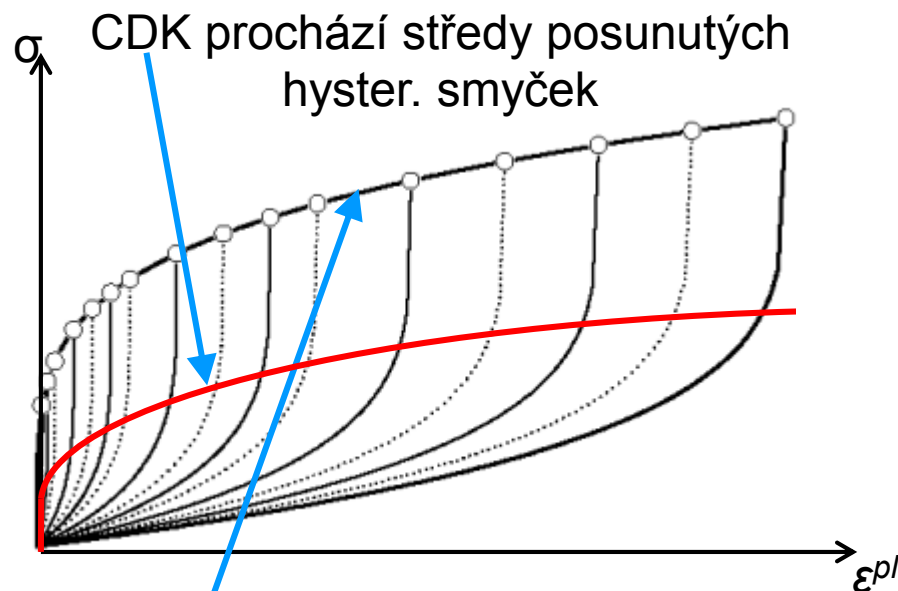
Hledáme rovnici pro popis
saturované hysterezní smyčky.

$$\Delta \varepsilon = f(\Delta \sigma)$$

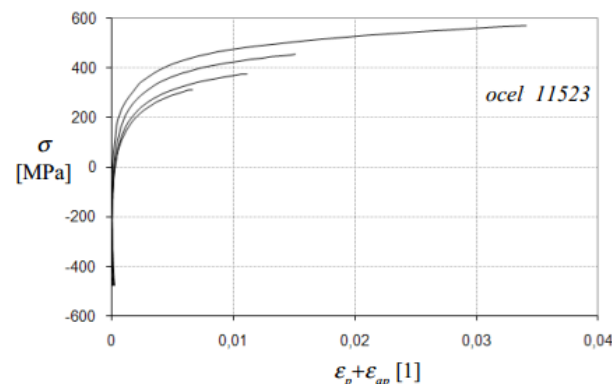
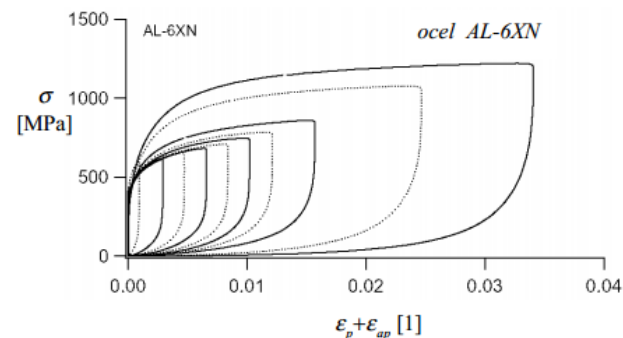
Důležité pro vyjádření stavu napětí-
deformace při složitém kmitavém
zatěžování



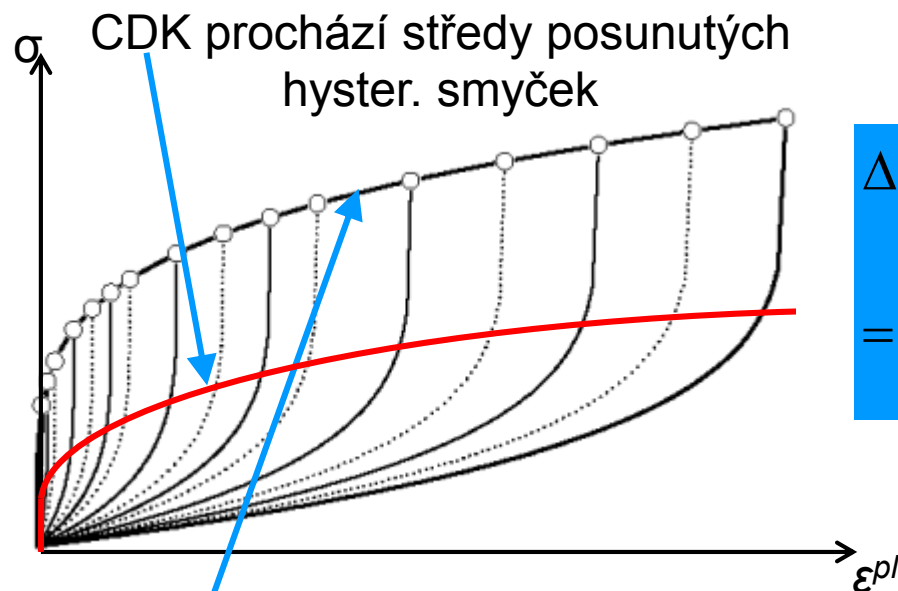
Masingova aproximace hysterezních smyček a CDK



Nevykazuje chování podle Masingova pravidla



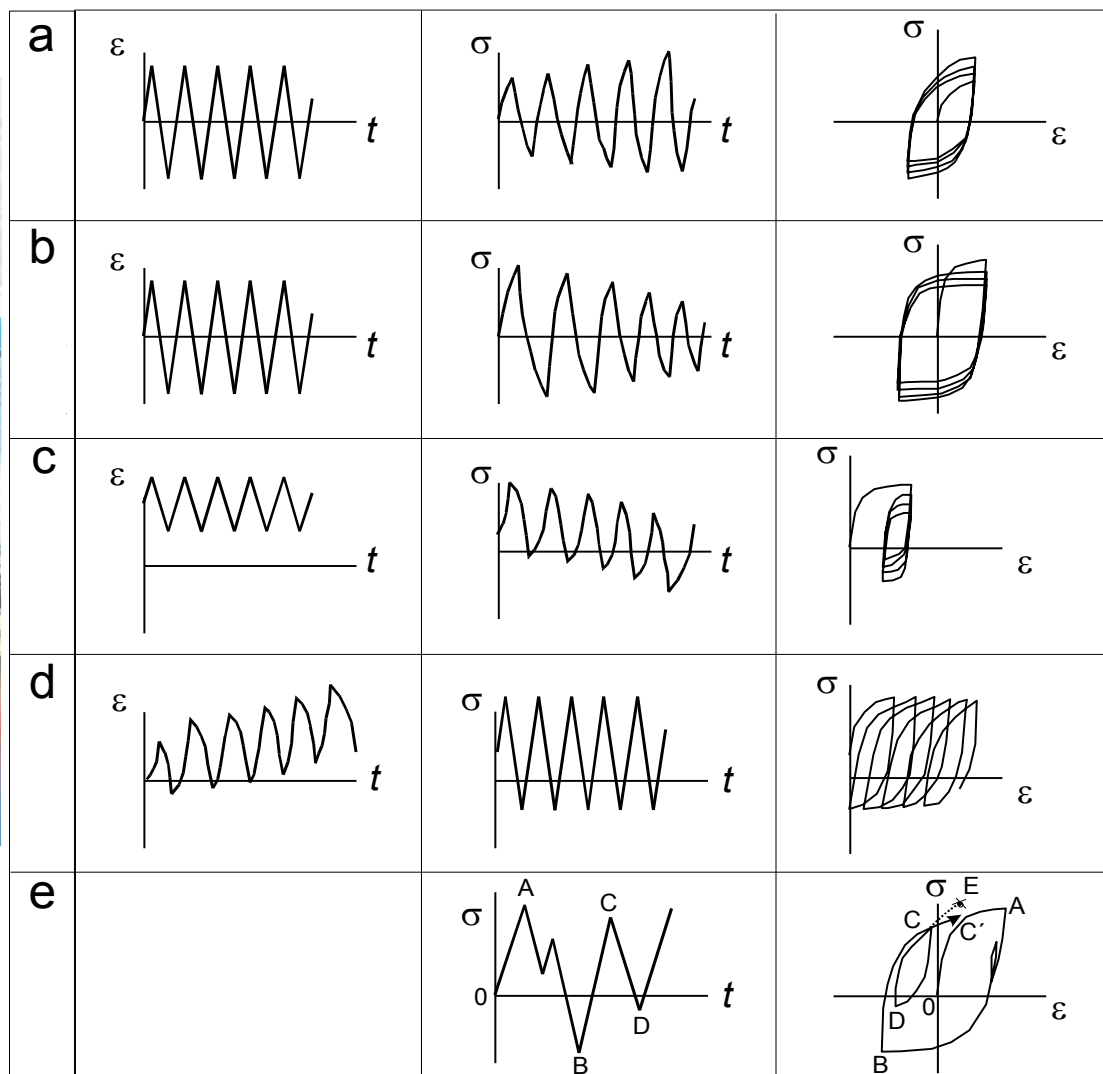
Masingova aproximace hysterezních smyček a CDK



$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon &= 2\varepsilon_a = 2\varepsilon_a^{el} + 2\varepsilon_a^{pl} = \\ &= \frac{2\sigma_a}{E} + 2 \cdot \left(\frac{2\sigma_a}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \cdot \left(\frac{\Delta \sigma_a}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}}\end{aligned}$$

1

Mechanické změny při cyklování



Cyklické
zpevnění

Cyklické
změkčení

Cyklická
relaxace

Cyklický creep
(ratcheting)

Paměťový
efekt

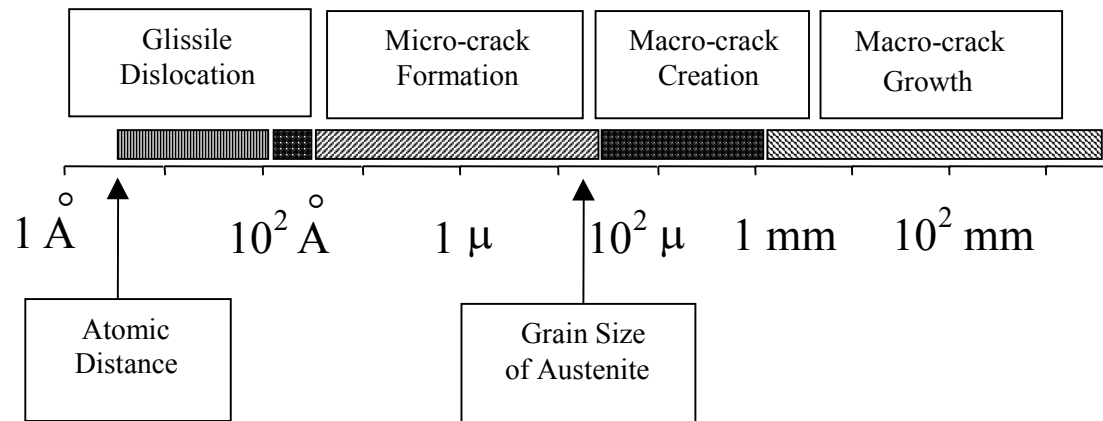
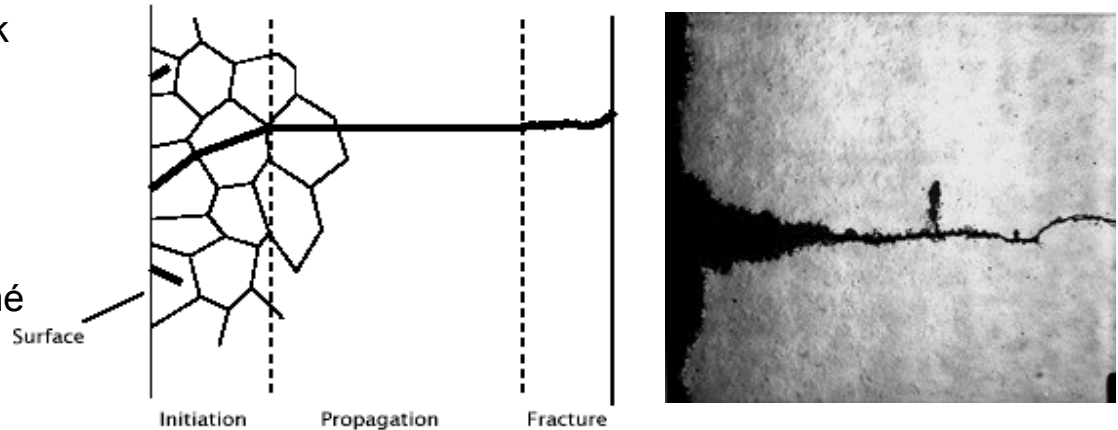
Fáze únavového procesu

1 • **Fáze změn mechanických vlastností** změny struktury kovu v celém objemu. Doba trvání několik procent života do lomu.

2 • **Fáze nukleace (iniciace) mikrotrhliny formování makrotrhliny**, zahrnuje lokální změny v povrchové vrstvě vyvolané dislokačními efekty a následné propojování mikrotrhlín nebo růst dominantní mikrotrhliny. Doba trvání 10 i 90 % života.

3 • **Fáze šíření makrotrhliny**, Zahrnuje stádium růstu dominantní makrotrhliny změnu jejího směru kolmo na max. hlavní napětí.

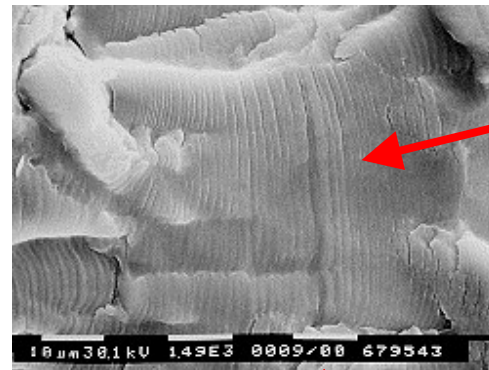
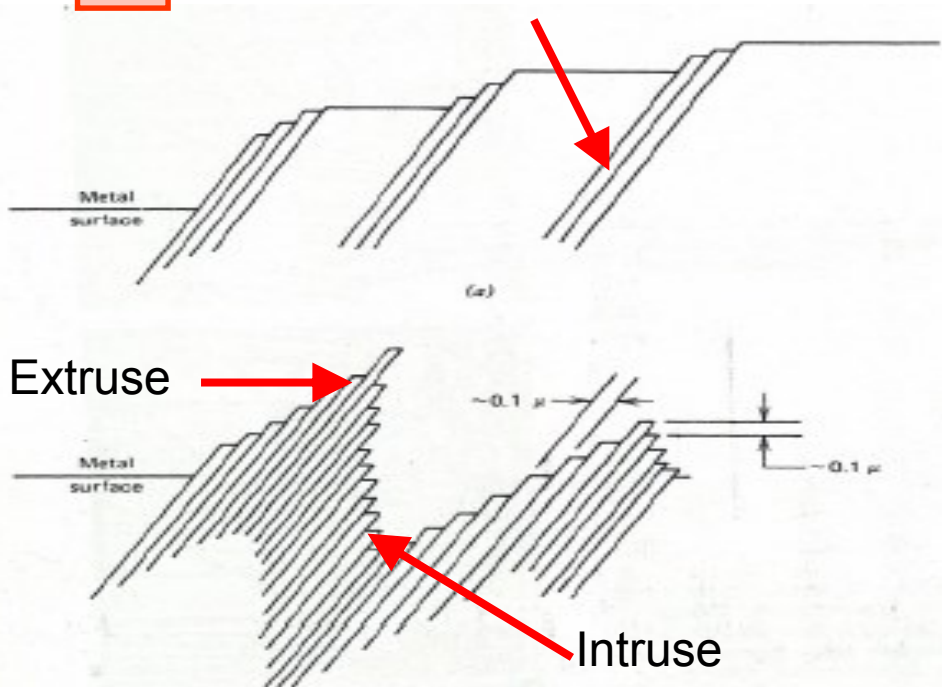
4 • **Fáze závěrečného lomu**, je reprezentována přechodem na zrychleným rozvojem zakončeným houževnatým nebo křehkým lomem na mezi kluzu nebo mezi pevnosti.



Místa iniciace, lomová plocha

2

Skluzová pásma



Striační čáry
postupu čela
trhliny

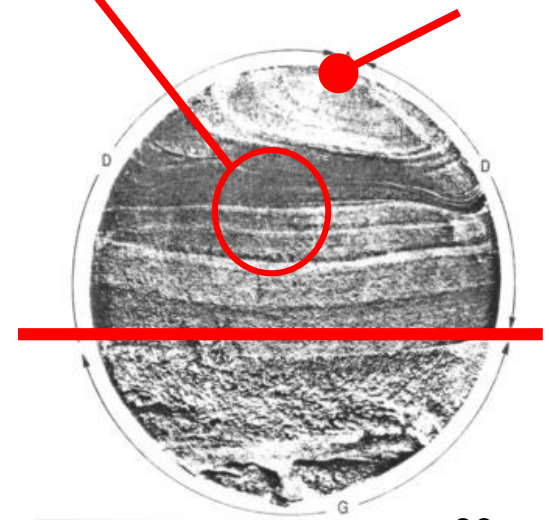
3

Únavové šíření

4

Kvazikřehké
porušení

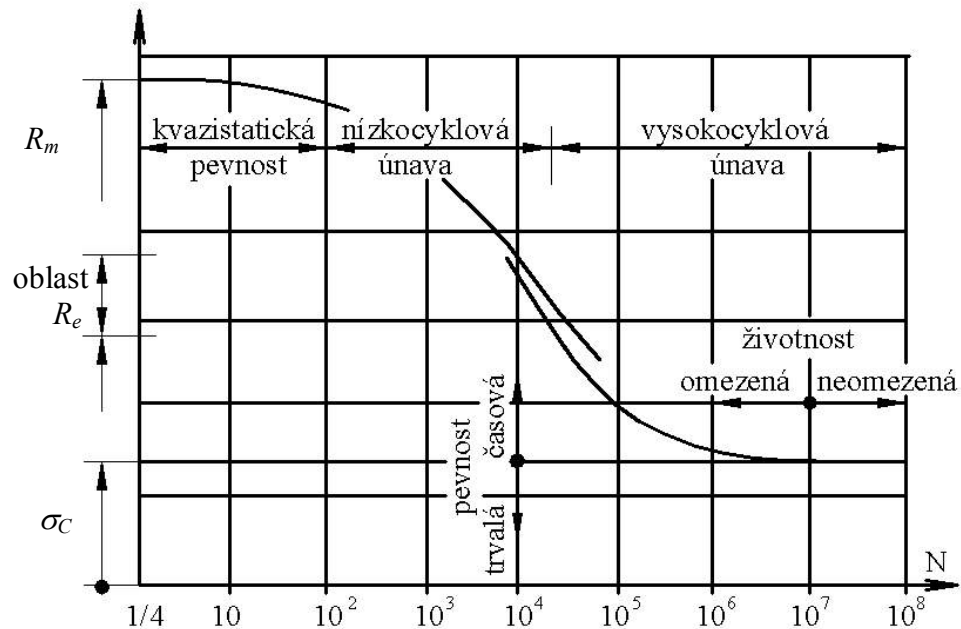
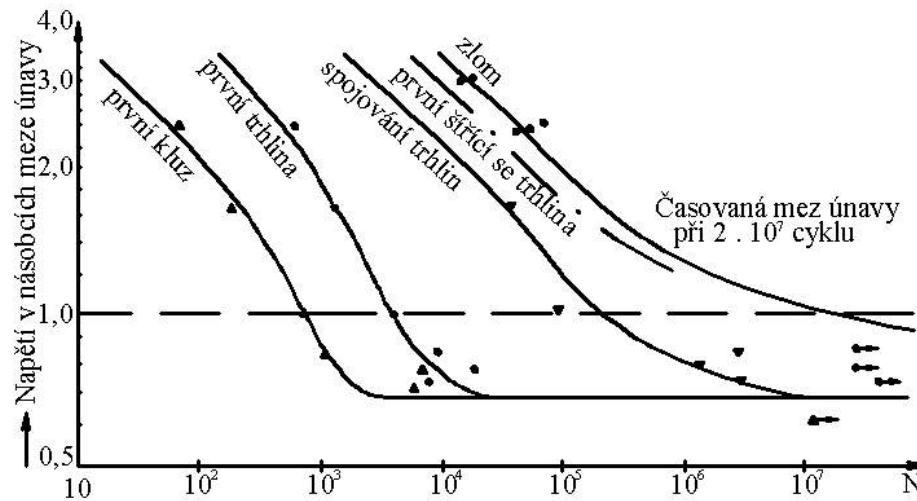
Místo
iniciace



Odkazy:

<https://www.youtube.com/watch?v=Oo2rLpbTY-8>

Fáze únavového procesu, oblasti únavové pevnosti a životnosti



Technický život

1 • Fáze změn mechanických vlastností.

- Doba trvání jednotky % únavového života

2

3

4 • Fáze závěrečného lomu.

- Doba trvání jednotky cyklů únavového života, náhlé porušení

Dominantní fáze jsou

1

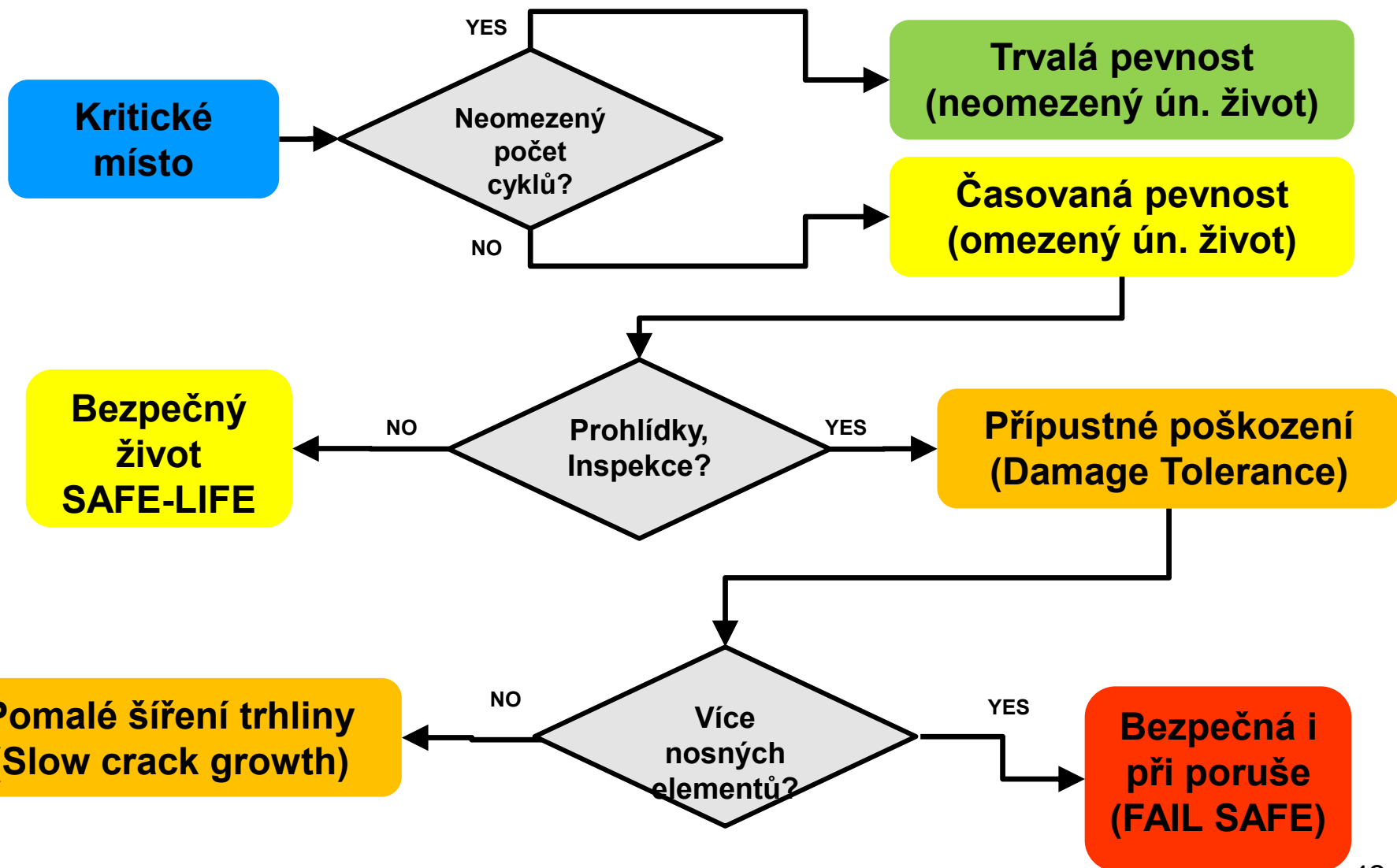
a

2

iniciace + šíření

$$N = N_i + \Delta N$$

Filosofie navrhování na únavu– přístupy



**Bezpečný
život
SAFE-LIFE**

$$L_B = \frac{L_{50}}{k_n \cdot k_N}$$

**Přípustné poškození
(Damage Tolerance)**

Inspekční intervaly: $t_i = \frac{\Delta}{(2 \dots 3)}$

