

# Degradace a mezní stavy materiálů

*Petr Šidlof*

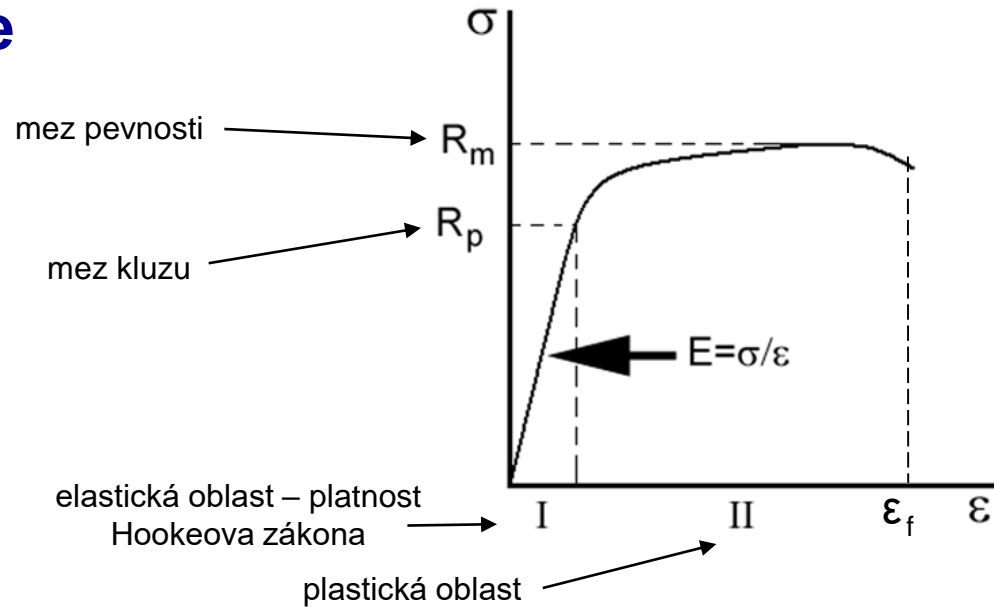
# Degradace a mezní stavy kovových materiálů

Změna vlastností materiálu, v důsledku které přestává být materiál v dané aplikaci vyhovující

- degradace statickým zatížením (plastická deformace, lom)
- degradace dynamickým zatížením (únava)
- degradace mechanickým opotřebením (otěr, kavitace)
- degradace tepelným zatížením (tečení – creep, poškození náhlou změnou teploty)
- chemická degradace - koroze
- radiační poškození
- **kombinace výše uvedených**



# Plastická deformace



- plastická deformace způsobuje nevratné změny v materiálu
- deformační zpevnění
- trvalá změna tvaru
- cyklická plastická deformace – akumulace poškození



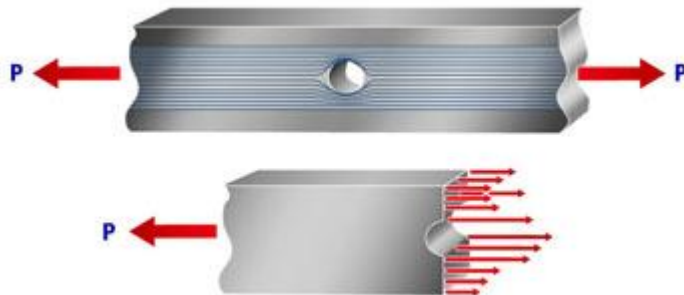
# Lom

Lom = přerušení materiálu vlivem mechanické síly

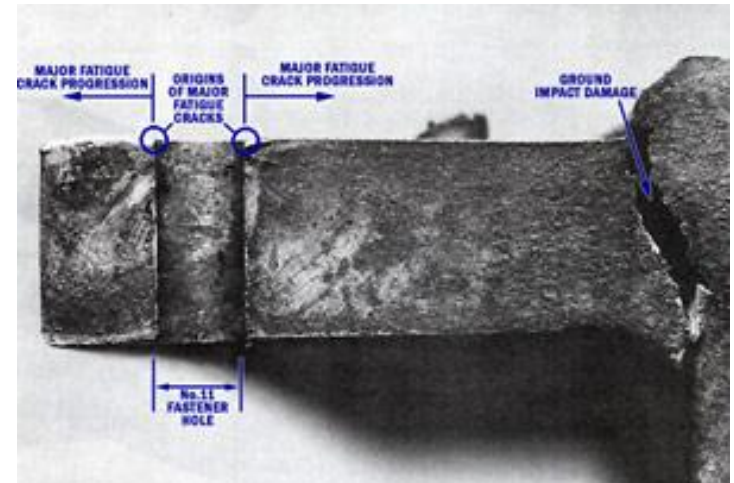
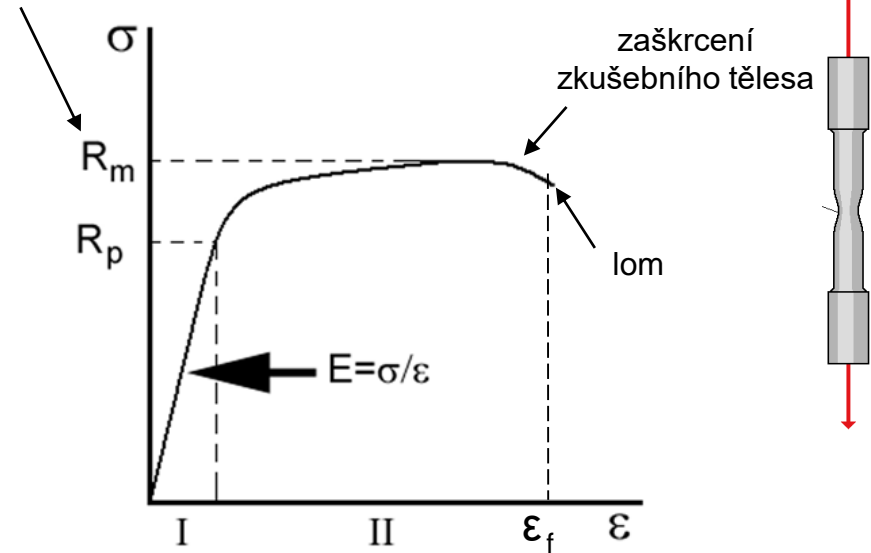
- k přerušení dojde při výrazně nižší síle, než by odpovídalo přerušení všech kovových vazeb
- klíčovou roli při lomu hrají **defekty** – dutiny, vměstky, trhliny

## Koncentrace napětí

- lokální zvýšení napětí v důsledku existence vrubu, otvoru, dutiny, trhliny



mez pevnosti



1977 Boeing 707-300 crash due to horizontal stabilizer fracture

<http://lessonslearned.faa.gov>

# Křehký a houževnatý lom

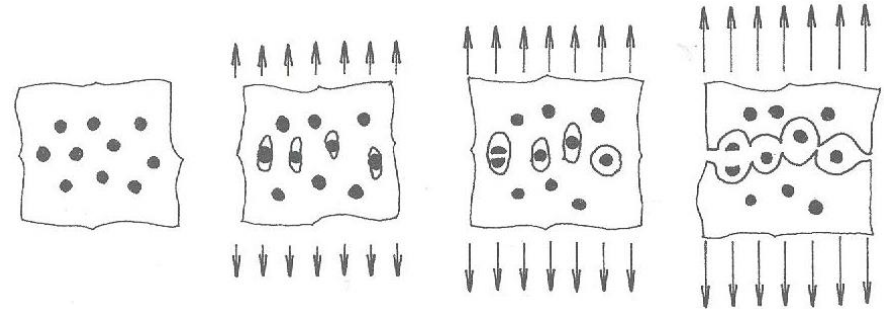
## Houževnatý lom

- plastická deformace
- spotřebovává energii
- kovy nad teplotou křehnutí
- vznik – vývoj – koalescence mikroporuch

Brittle Fracture

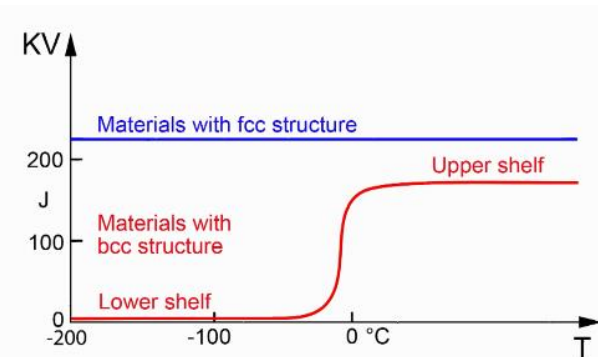
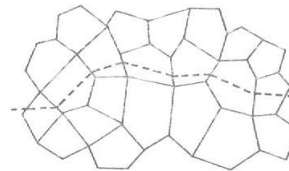


Ductile Fracture



## Křehký lom

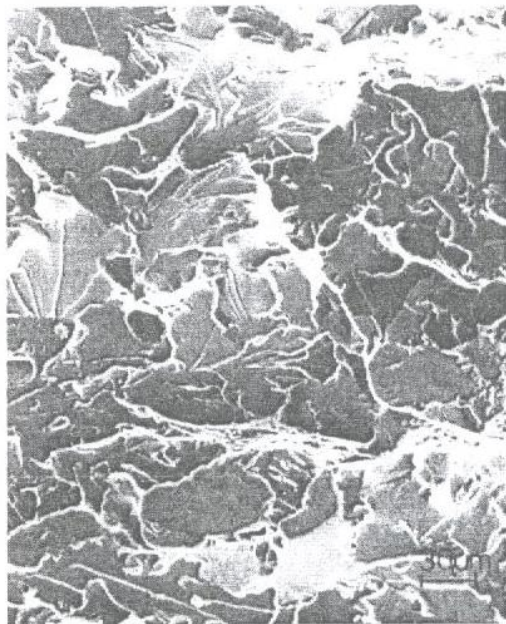
- bez plastické deformace, nespotebovává energii, nestabilní
- vysoká rychlost lomu
- sklo, keramika, kovy při nízkých teplotách



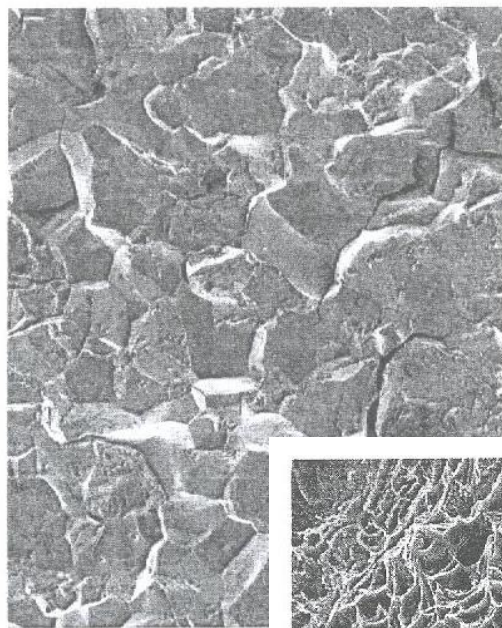
Za jakých okolností dojde k lomu – **lomová mechanika**



## Štěpný a tvárný lom

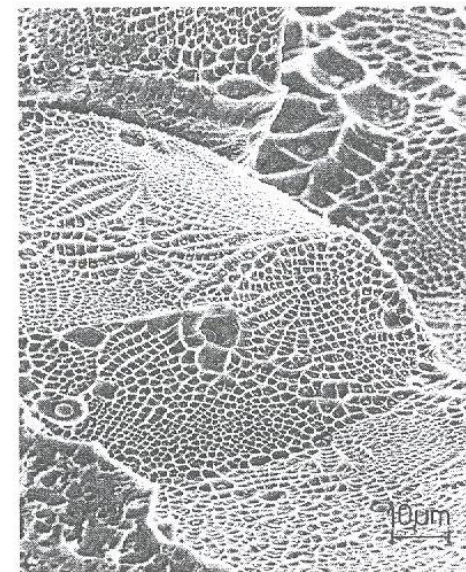
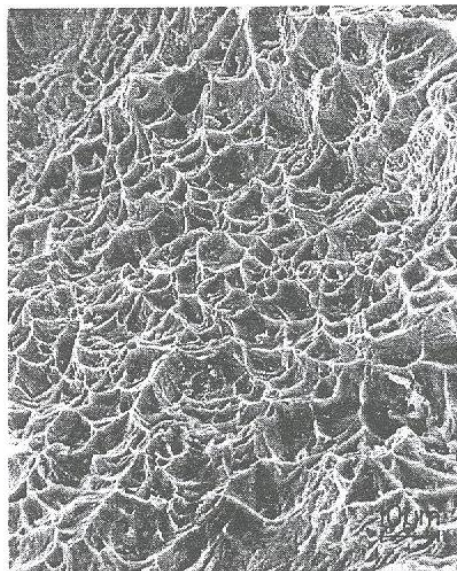


Transkrystalický  
štěpný lom  
(ocel 11 600)



Transkrystalický  
tvárný lom  
(Fe-Cr-Ti-Ni)

Interkrystalický  
štěpný lom  
(Fe-Al-Cr)

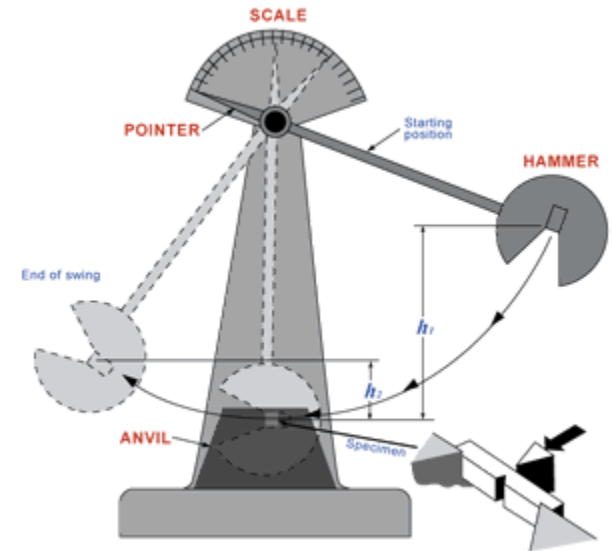


Interkrystalický  
tvárný lom  
(Fe-Cr)

# Houževnatost materiálu

## Vrubová houževnatost

- zkouška Charpyho kladivem
- energie nutná k přeražení vzorku o daném průřezu .. KCU [J/m<sup>2</sup>]



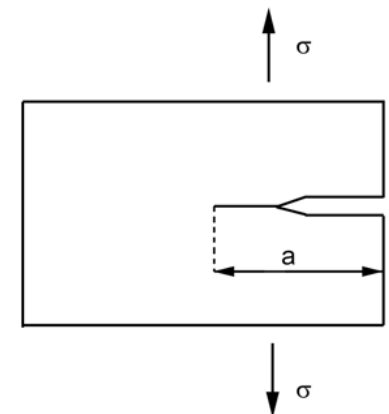
<https://forum.canadianwoodworking.com>

## Lomová houževnatost

Faktor intenzity napětí (1. mód):

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(a, W, L, \dots)$$

lomová houževnatost  $K_{IC}$  .. kritická hodnota  $K_I$ , při které nastane růst trhliny



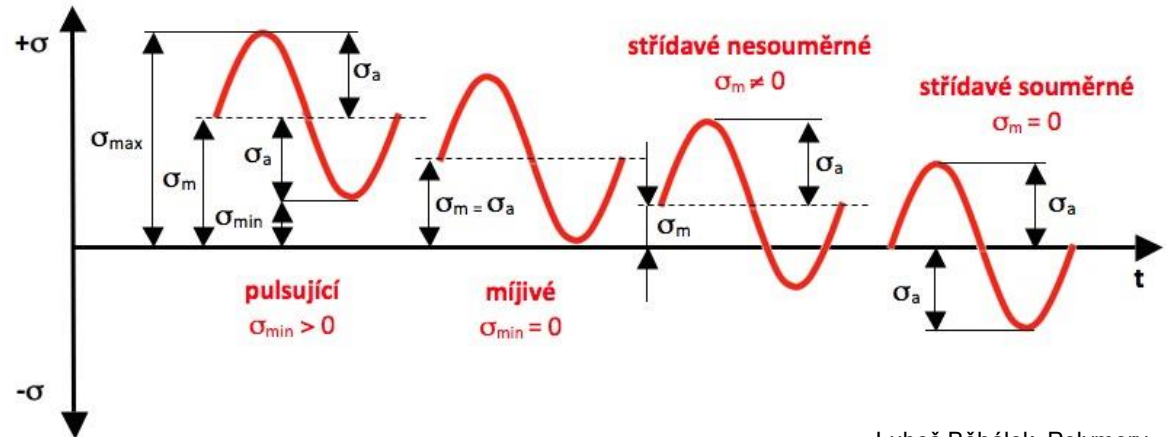
Materiál	$K_{IC}$ [MPa·m <sup>1/2</sup> ]	Materiál	$K_{IC}$ [MPa·m <sup>1/2</sup> ]
sklo	0,8	epoxid. pryskyřice	0,5
polyethylen	2	uhlíková ocel	100
keramika Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	hliníkové slitiny	20-50

# Únava (1)

Lom materiálu způsobený  
cyklickým namáháním

NCÚ: do  $10^4$  cyklů

VCÚ:  $10^4 \dots 10^8$  cyklů



Luboš Běhálek, Polymery

## Mechanismus

- cyklická mikroplastická deformace v místech koncentrace napětí

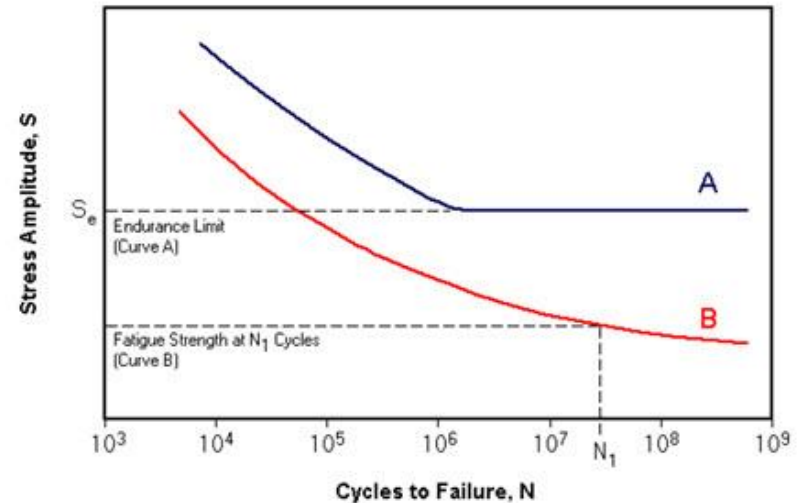
## Fáze

- nukleace trhliny
- šíření trhliny
- dolom



# Únava (2)

## Mez únavy – Wöhlerova (S-N) křivka



<http://www.totalmateria.com>

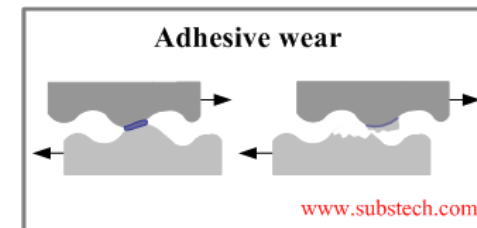
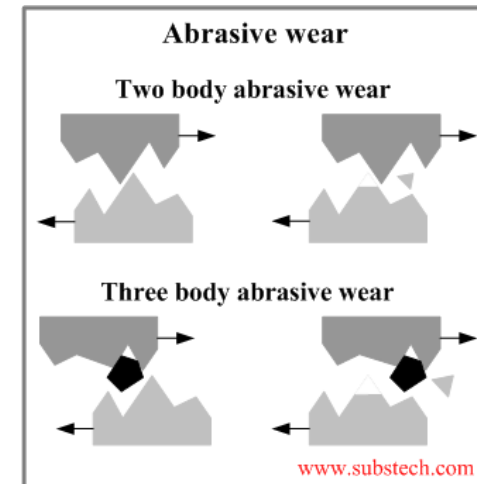
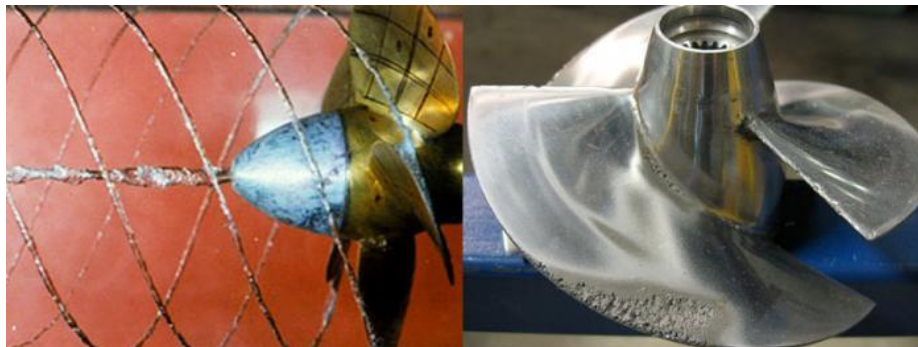
## Prevence poruch z důvodu únavového porušení

- napětí pod mezí únavy (infinite life concept)
- periodické sledování trhlin, výměna součástky bezpečně před dolomem (damage tolerant design)
- výpočet bezpečné doby života před výměnou součástky (safe-life design)
- redundantní konstrukce – funkční celek i při poruše libovolné součástky (fail-safe design)

# Opotřebení

změny povrchu v důsledku mechanického kontaktu s jiným tělesem (často třením) nebo tekutinou

- abrazivní opotřebení – poškození povrchu tvrdým povrchem jiného tělesa
- adhezivní opotřebení – kontakt a porušení v důsledku meziatomových sil
- erozivní opotřebení – částice nesené tekutinou
- kavitační opotřebení – v důsledku kavitace (lodní šrouby, čerpadla, potrubí)



## Creep (tečení)

- pomalá časem rostoucí trvalá deformace materiálu pod vlivem mechanického napětí nižšího než mez kluzu
- creep významně roste při vyšších teplotách
- mechanismus – difuze vakancí, šplhání dislokací, cross-slip, pokluzy na hranicích zrn

### Poznámka

vysoká teplota:  $T / T_M > 0.3$

olovo ..... 20°C je vysoká teplota

ocel ..... 20°C je nízká teplota

### Žáropevné materiály

- niklové superslitiny
- žárovevné oceli (Mo, V, W)
- (keramika)



Zřícení jižní věže WTC, 9/11 2001

# Poškození náhlou změnou teploty

náhlé změny teploty → nerovnoměrné rozložení teploty v tělese → vnitřní pnutí v důsledku tepelné roztažnosti

- může vést k plastické deformaci nebo lomu

## Nebezpečné materiály

- vysoký koeficient teplotní roztažnosti
- špatná tepelná vodivost
- křehké materiály



## Koroze kovů

chemická degradace za přítomnosti kyslíku a případně vody

- koroze v *plynném* prostředí (kovy při vysoké teplotě bez ochranné atmosféry)
- koroze v *kapalném* prostředí (konstrukce pracující ve vodě, potrubí, atmosférické vlivy, vzdušná vlhkost)



### Koroze v plynném prostředí

- reakce kovu s kyslíkem za vzniku oxidů – při vysokých teplotách
- kinetika ovlivněna zejména vlastnostmi oxidické vrstvy (transport kyslíku)

### Koroze v kapalném prostředí

- oxidace kovu  $M \rightarrow M^{n+} + n e^{-}$
- redukce prostředí  $H_2O + O_2 + e^{-} \rightarrow H_2, OH^{-}$
- reakce kovových kationtů s produkty – oxidy, hydroxidy, uličitany, sírany

# Ochrana proti korozi

- pasivace – samotná vrstva korozních produktů (korozi-vzdorné oceli, dural, titan, zinek)
- galvanické nebo žárové pokovování
- nátěry
- katodická ochrana (záporná polarizace, obětovaná anoda)
- úprava prostředí – inhibitory (ústřední topení)