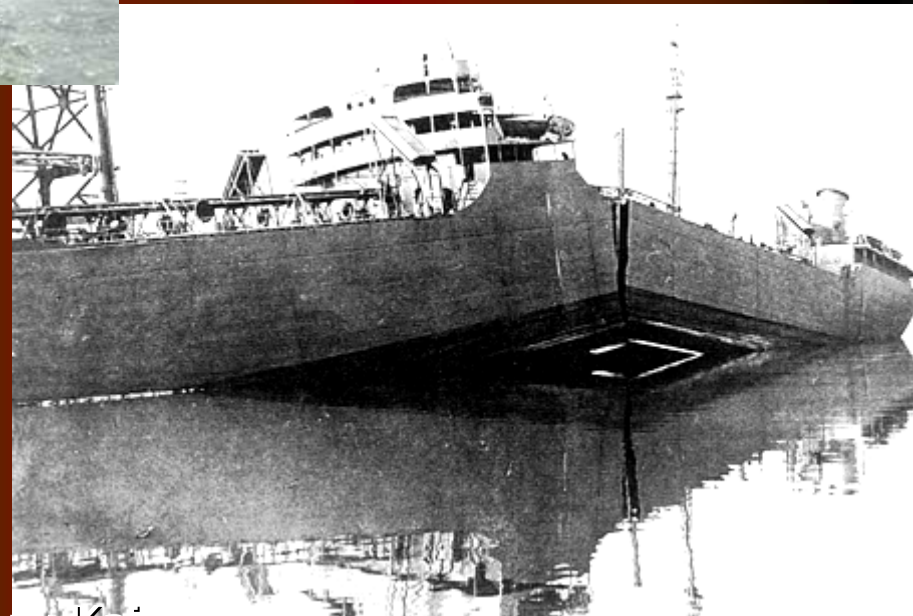


# ROSIE THE RIVETER NATIONAL PARK



H



Henry Kaiser,

# Houževnatost

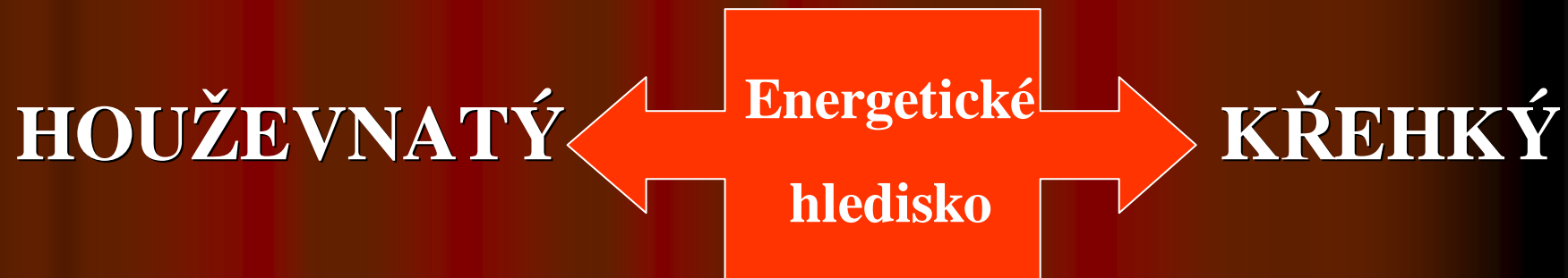
- i. Základní pojmy (tranzitní lomové chování ocelí, teplotní závislost pevnostních vlastností, fraktografie)**
- ii. (Empirické) zkoušky houževnatosti (Charpy, TNDT)**
- iii. Lineárně-elastická lomová mechanika (Irwin, zkoušky lomové houževnatosti)**
- iv. Elasto-plastická lomová mechanika (zkoušky, interpretace, podmínky šíření trhliny)**

# Tranzitní lomové chování ocelí

- Základní pojmy
- Může vzniknout štěpný lom oceli při zkoušce tahem?
- Co má vliv na tranzitní teplotu oceli
  - z hlediska podmínek zatěžování ?
  - z hlediska struktury ?

**Odolnost materiálu vůči porušení  
= houževnatost**

**Lom je**



### Kovové materiály s **fcc** mřížkou o typu lomu nerozhoduje teplota

- Čisté kovy – lomu vždy předchází plastická deformace a tedy lom bude houževnatý
- Slitiny – zablokování dislokací – lom bude křehký (např. zvonovina)

### Kovové materiály s **hcp** mřížkou o typu lomu rozhoduje teplota

- Malý počet skluzových systémů – lom je zpravidla křehký – pouze za zvýšených teplot je možné vyvolat plastickou deformaci

### Kovové materiály s **bcc** mřížkou **$\alpha$ - železo**

o typu lomu rozhoduje teplota, rychlost zatěžování a napjatost (tloušťka stěny, vruby)

Při vyšších teplotách je zpravidla lom **houževnatý**, za nízkých teplot lom **křehký**.

Změna charakteru lomu vlivem poklesu teploty se označuje pojmem **tranzitní lomové chování ocelí** a teplota tranzitu (přechodu) je **tranzitní teplota**.



# Při havárii se prohlíží lomová plocha - **FRAKTOGRAFIE**

Typ lomu se rozlišuje podle mechanismu, jakým vznikl:

Předchází-li lomu plastická deformace nebo též přetvoření – mluvíme o *tvárném lomu*

Nepředchází-li lomu významná makro-plastická deformace, pak se lom šíří po hranicích zrn nebo v krystalografických rovinách – mluvíme o *štěpném lomu*

**Lom je**

**HOUŽEVNATÝ**

**Energetické  
hledisko**

**KŘEHKÝ**

## Základní pojmy

- Nízkoenergetický
- Houževnatý

- Křehký

Interkrystalický  
Transkrystalický

TVÁRNÝ

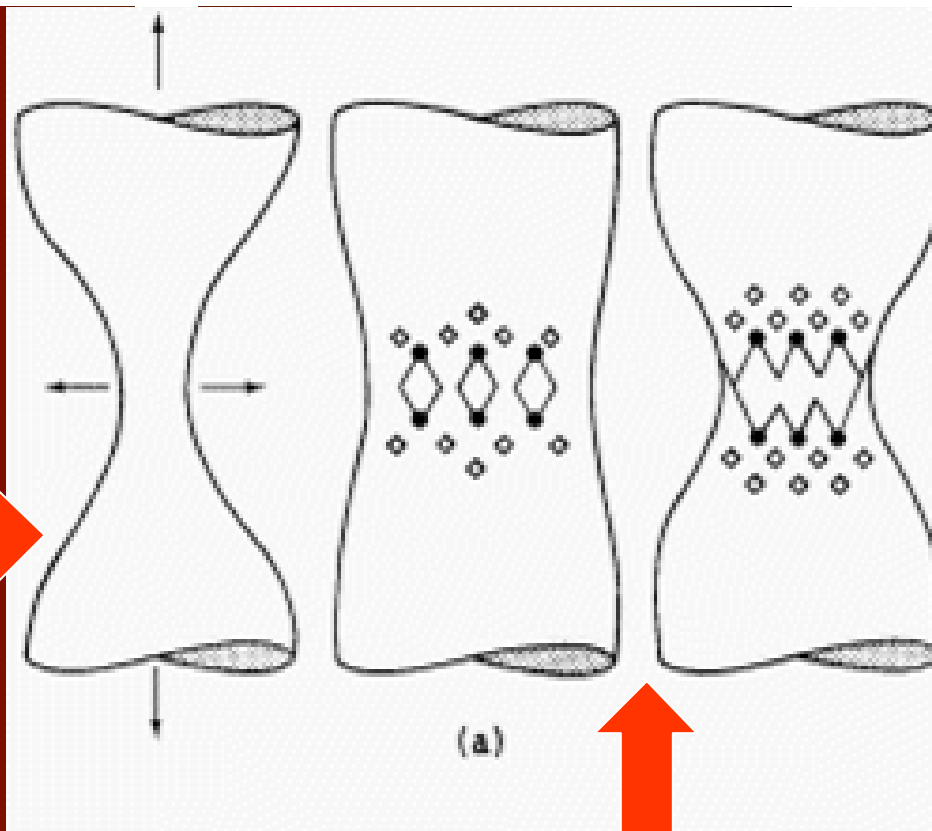
ŠTĚPNÝ

Z hlediska  
mechanismu

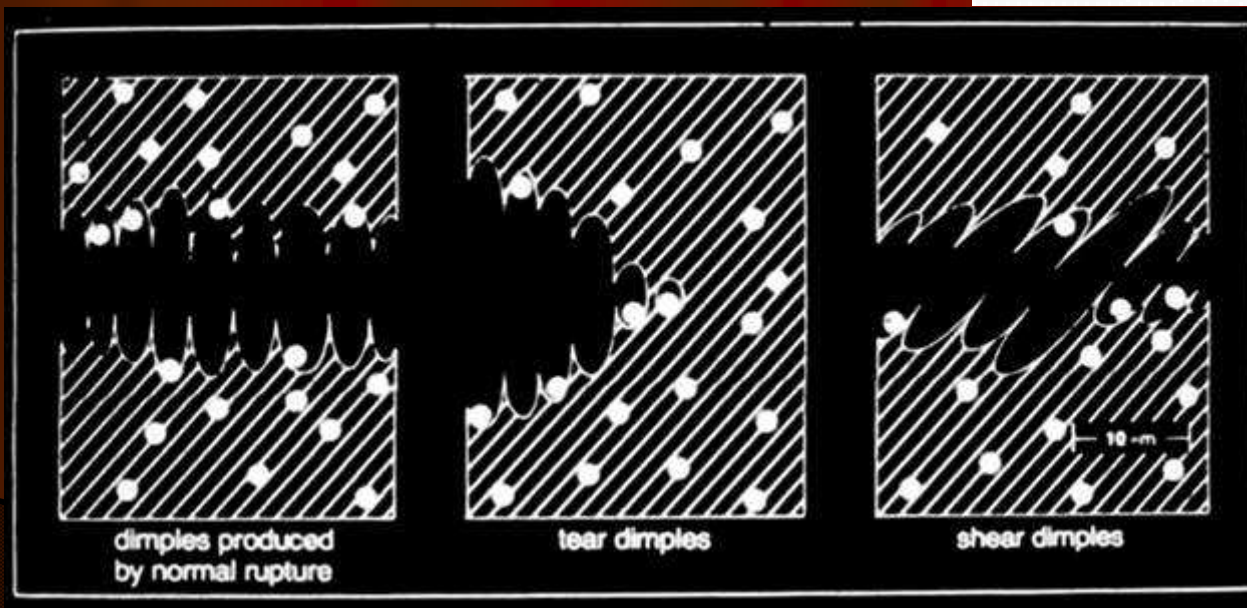


# Tvárný lom

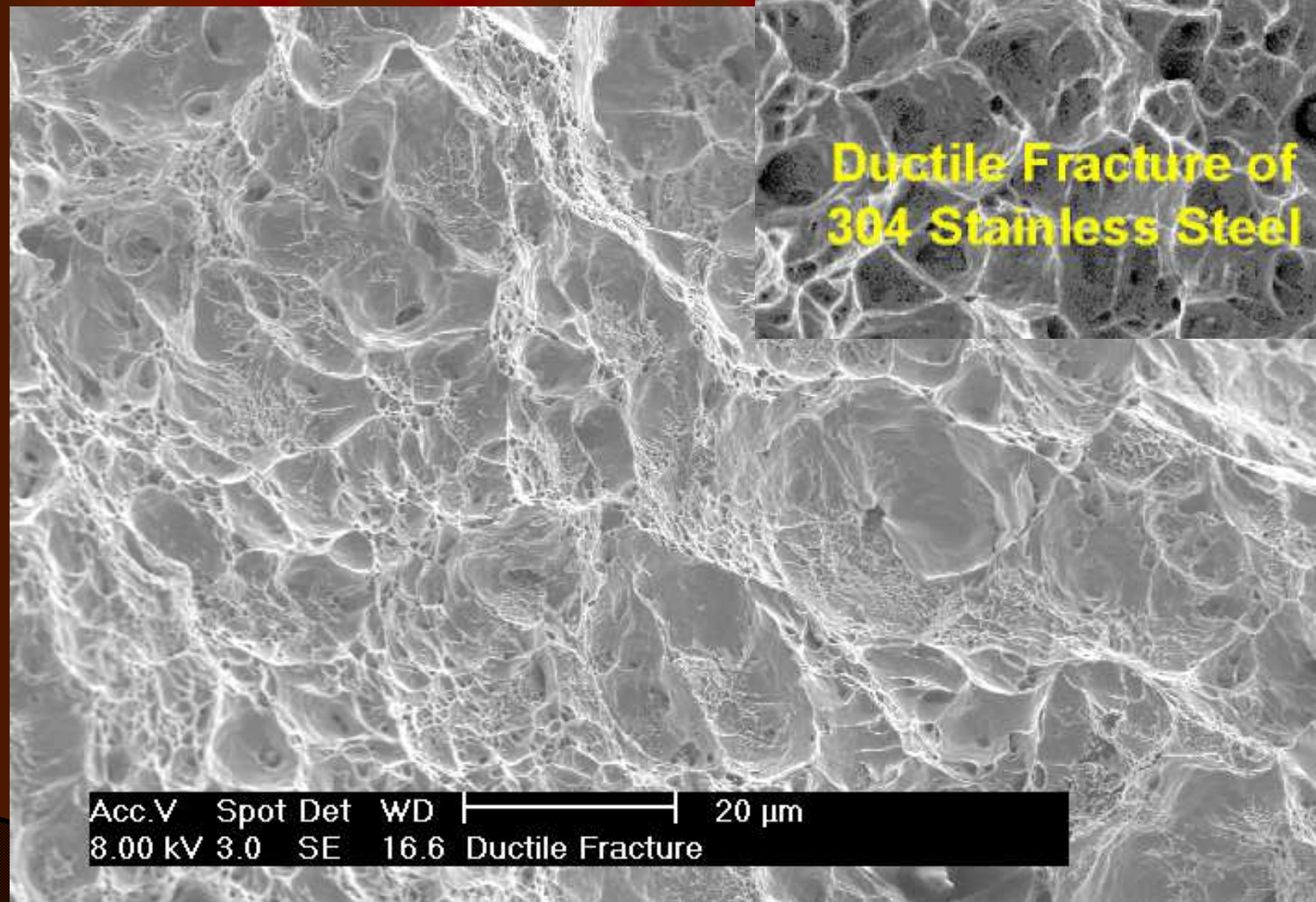
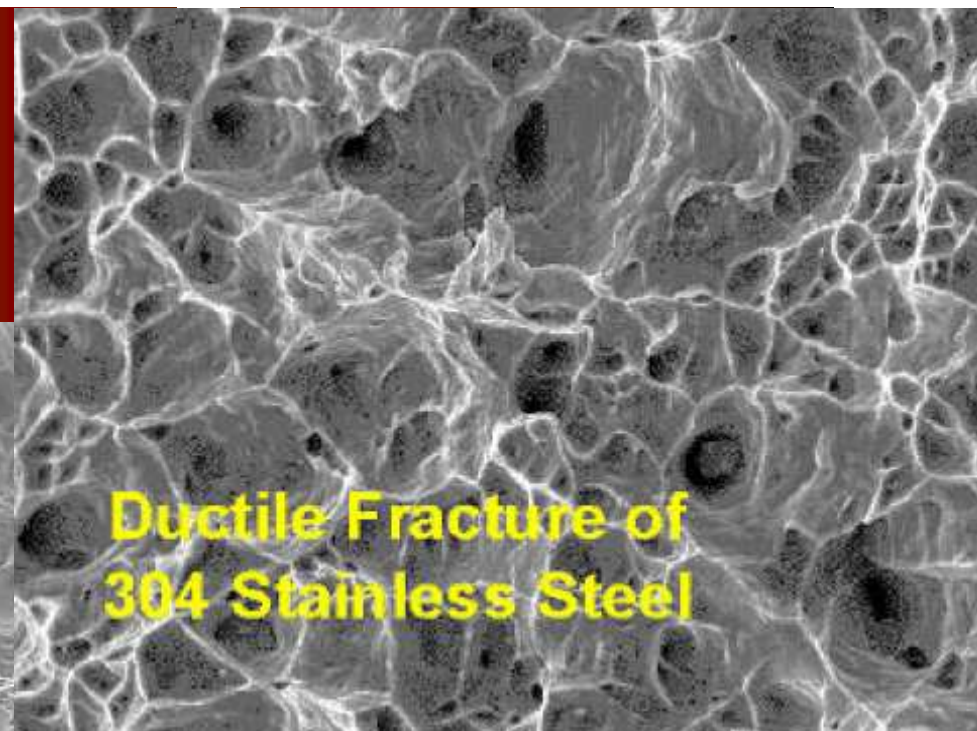
čisté kovy



slitiny

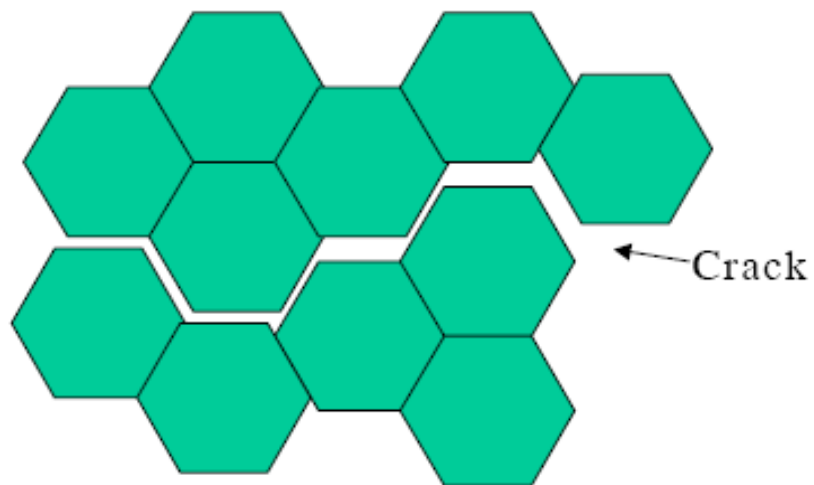


# Tvárný lom

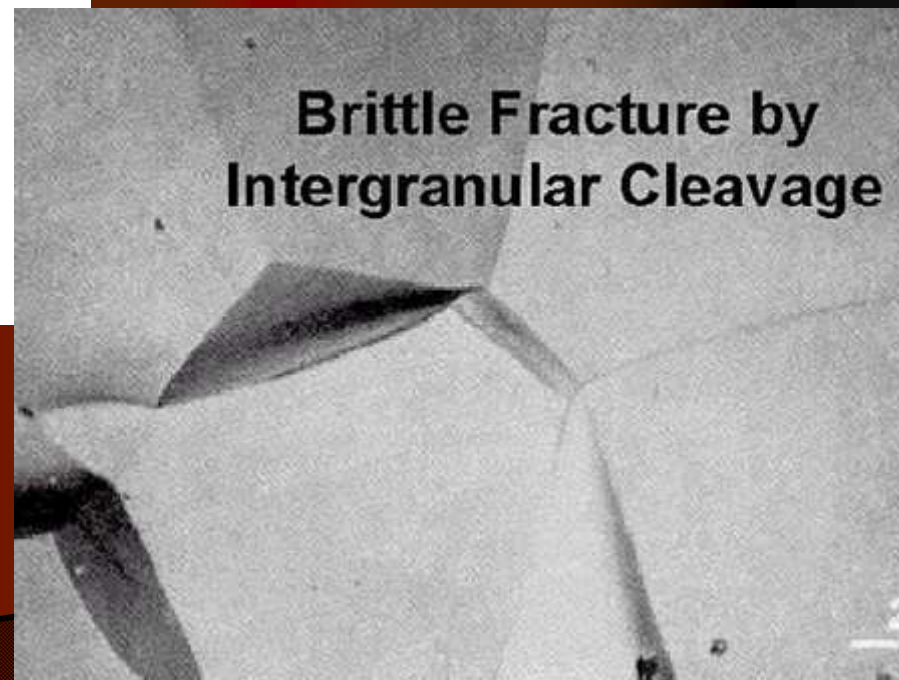


# Štěpný - interkrystalický

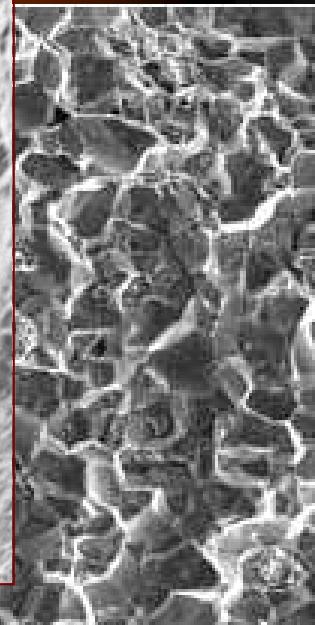
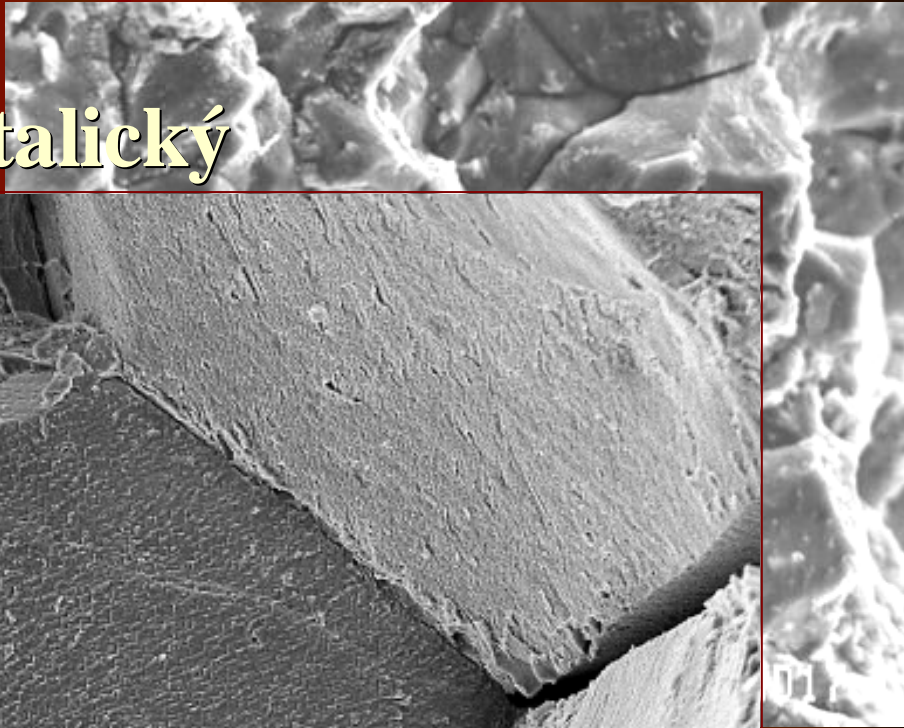
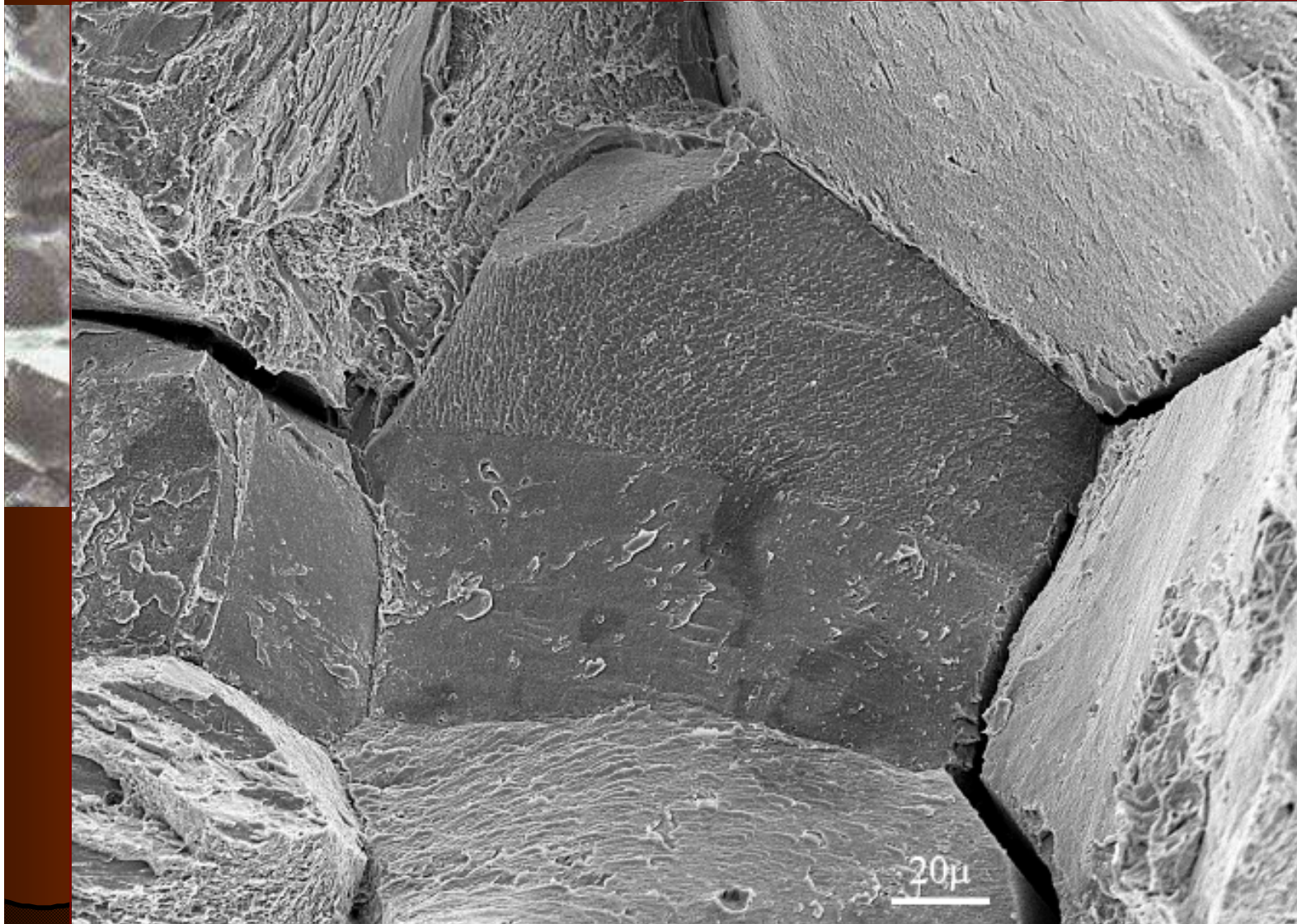
## Intergranular or INTERCRYSTALLINE



**Brittle Fracture by  
Intergranular Cleavage**

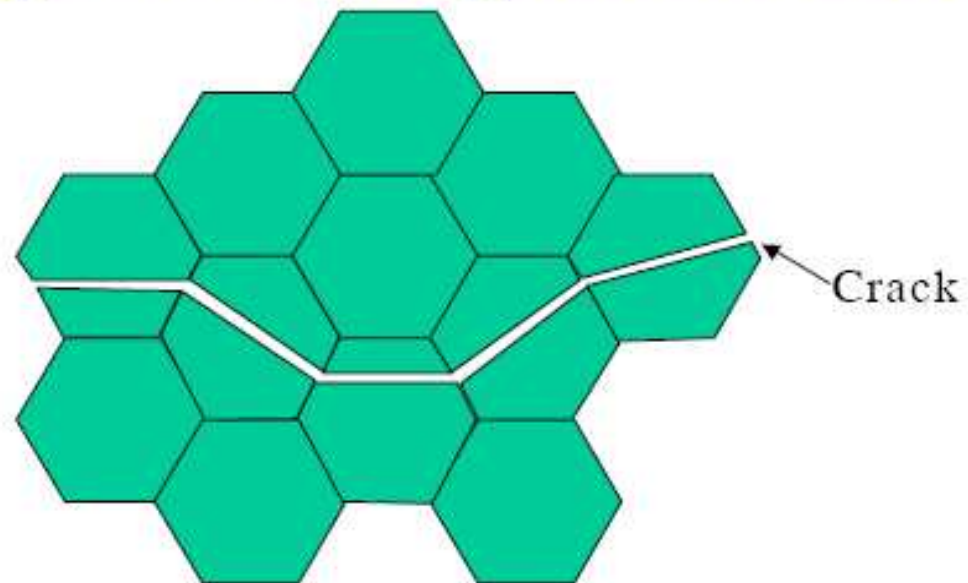


# Štěpný - interkrystalický



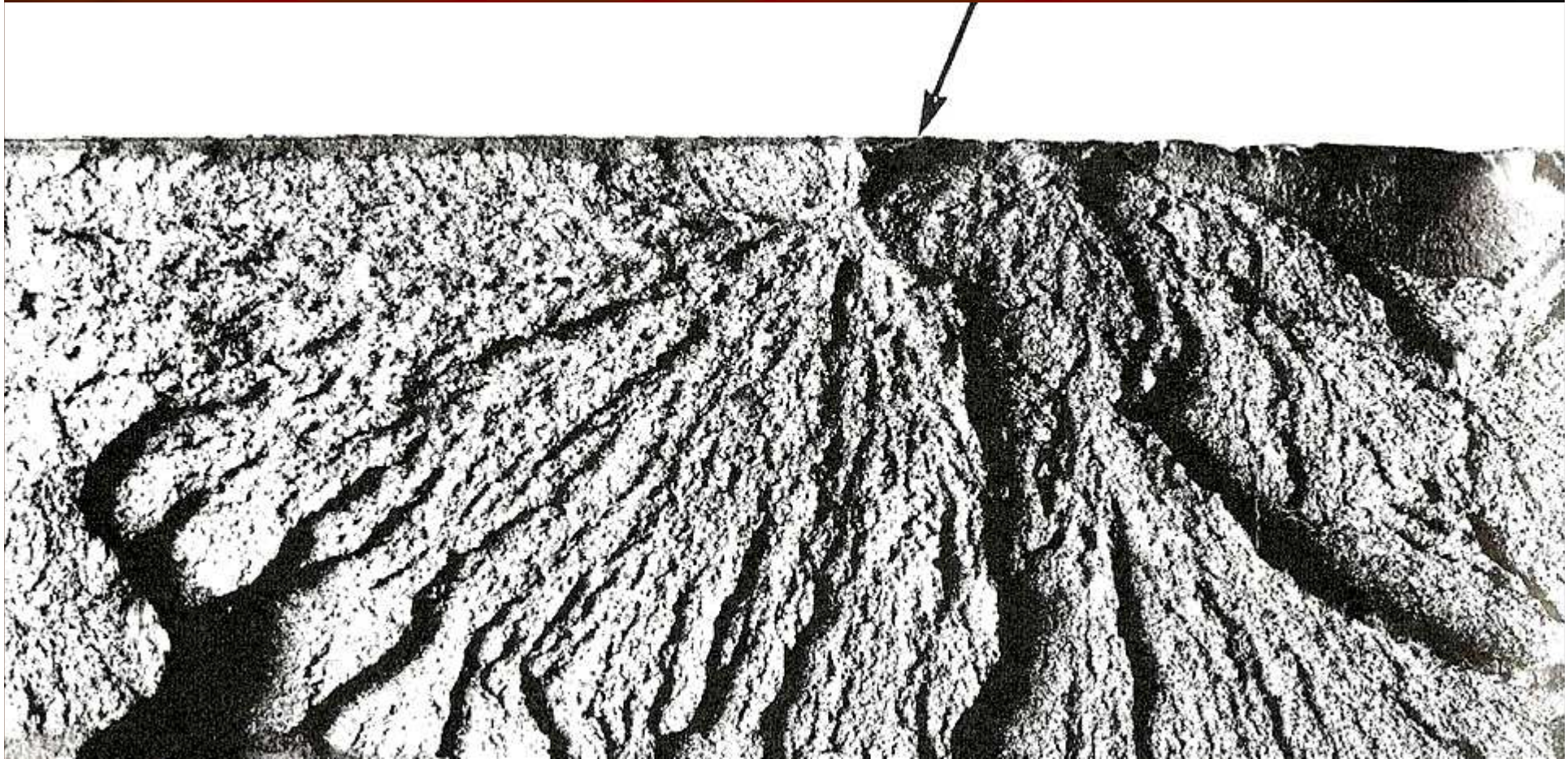
# Štěpný - transkrystalický

## Cleavage or Transgranular Fracture

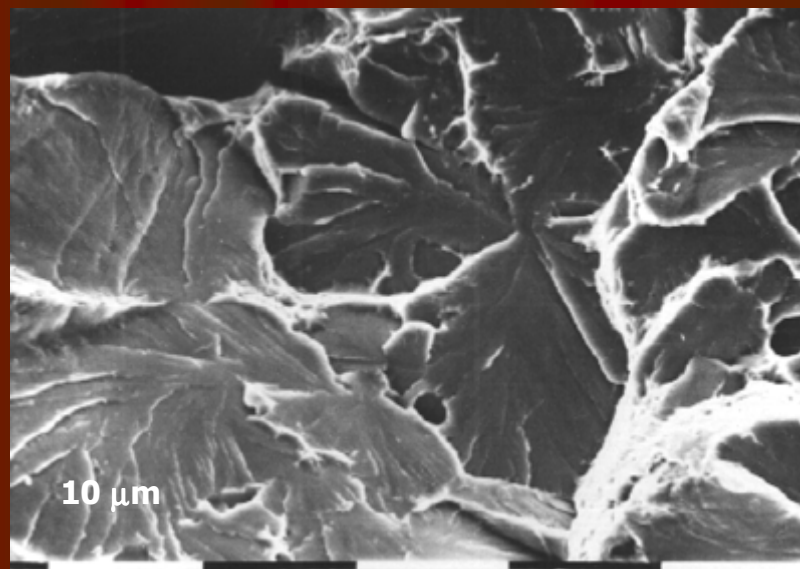
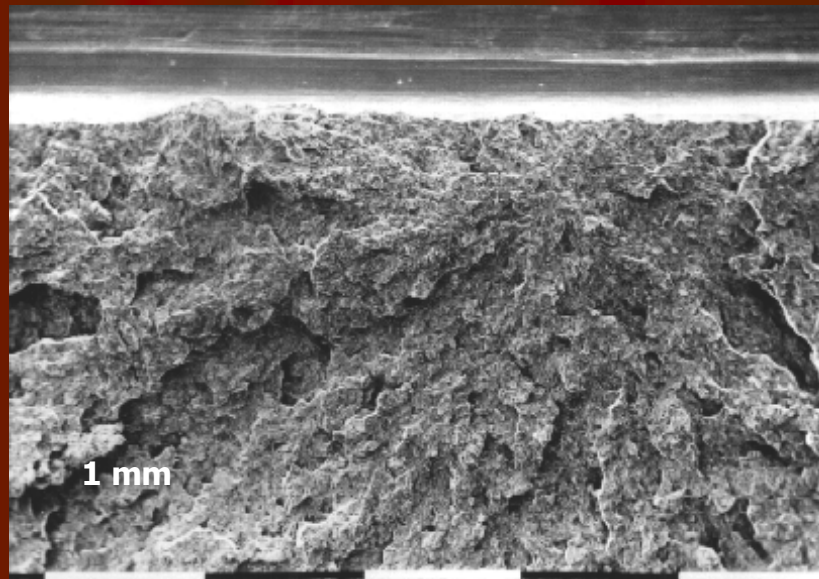
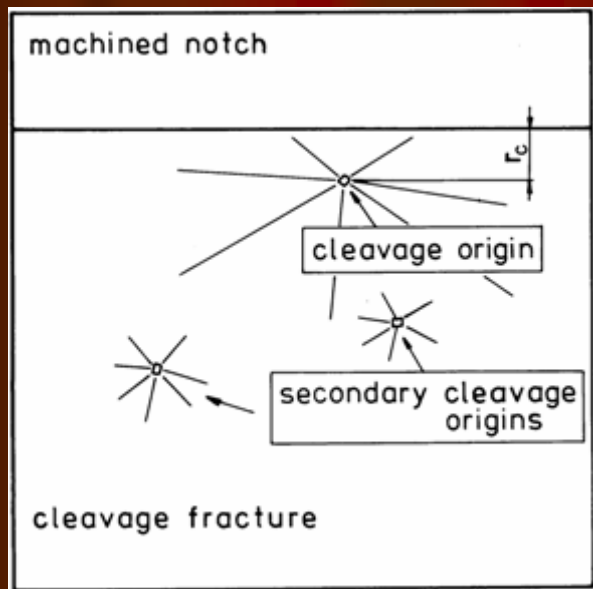




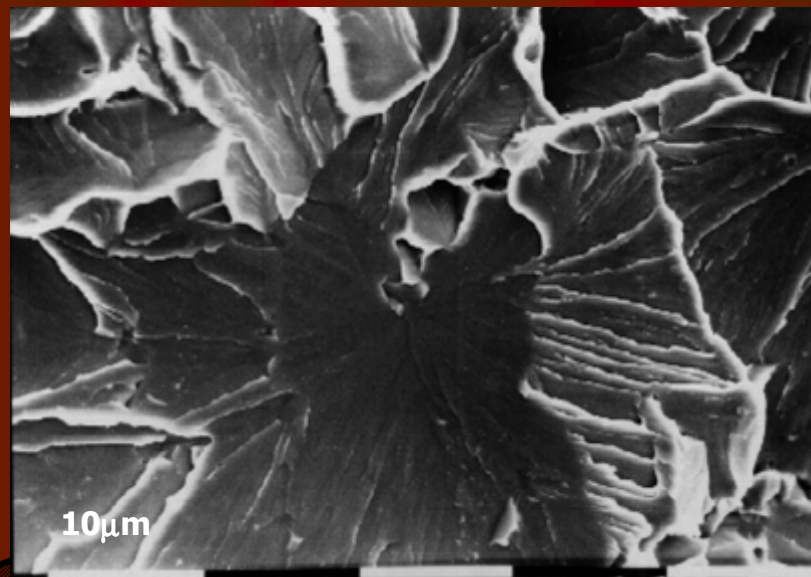
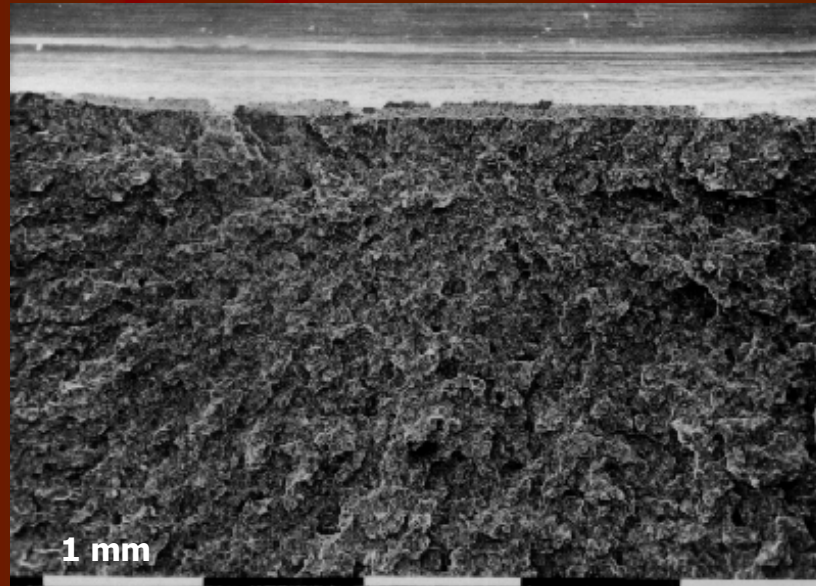
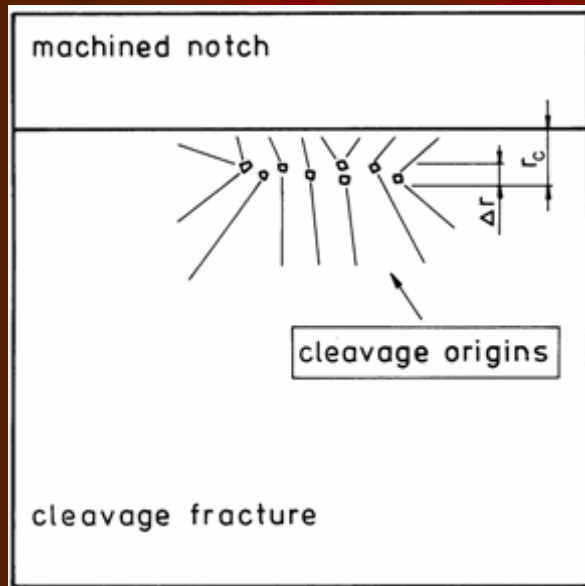
# Štěpný - transkrystalický



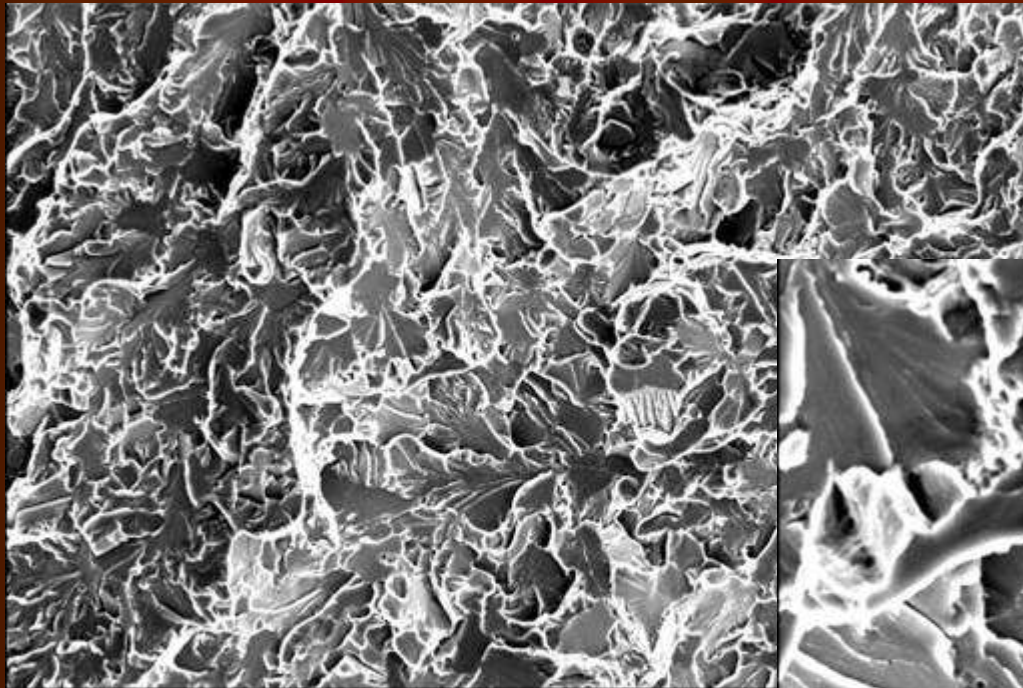
# Štěpný - transkrystalický



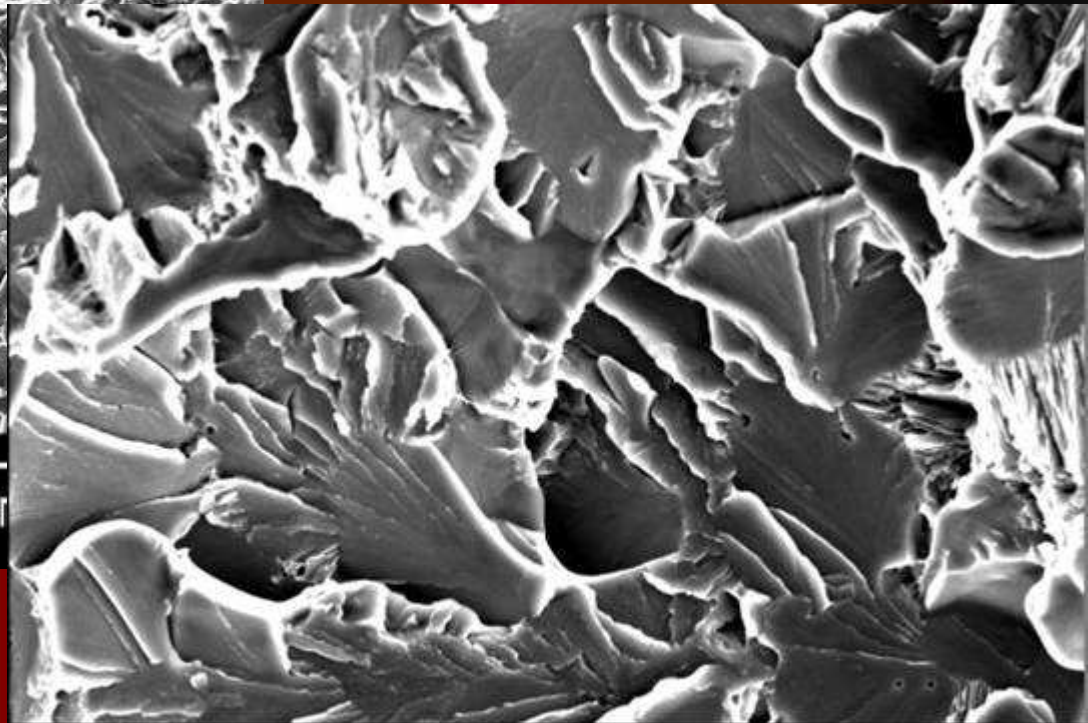
# Štěpný - transkrystalický



# Štěpný - transkrystalický



0042 20KV X500 10µm



0041 20KV X2,000 10µm WD24

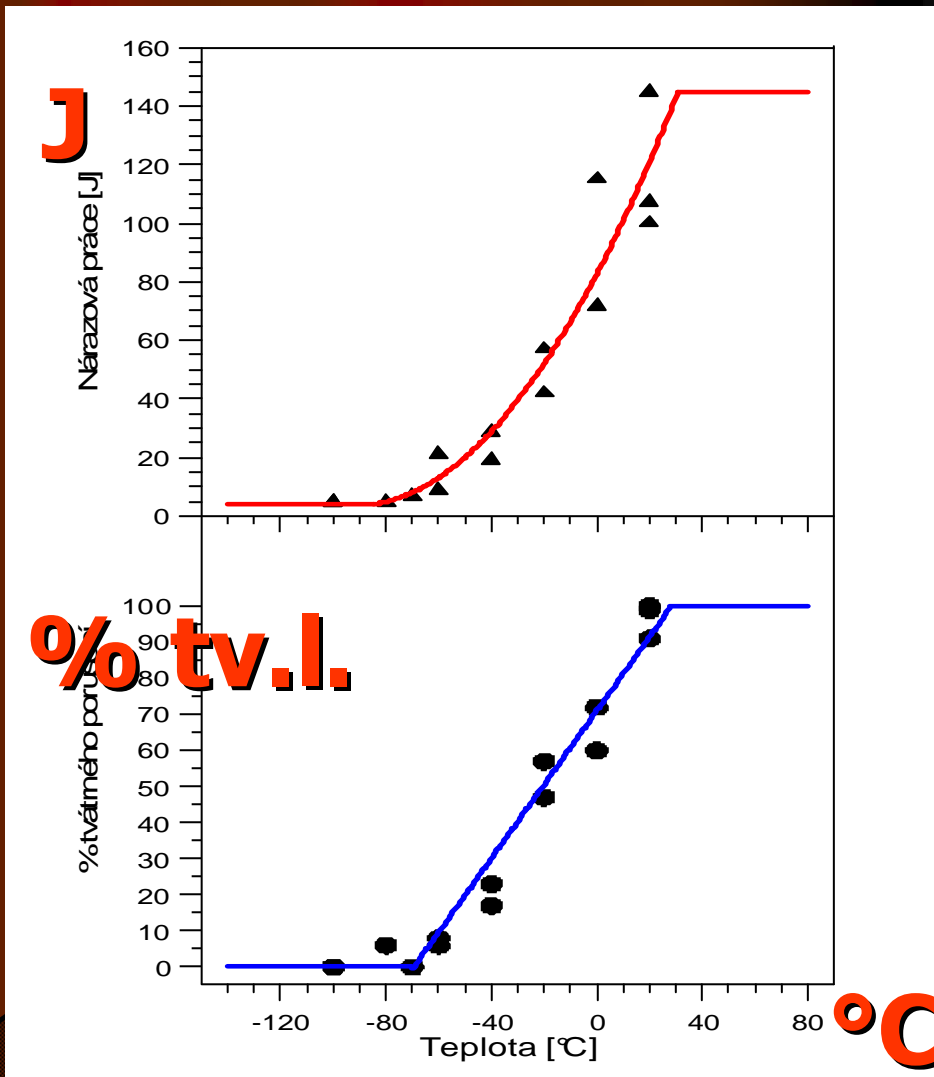
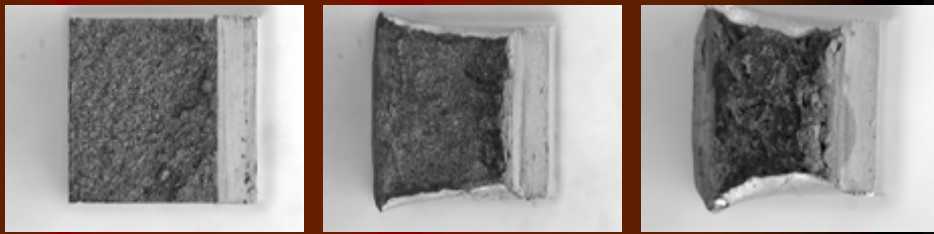
**Kdy dojde u dané konkrétní oceli ke změně charakteru lomu (havárii) rozhodují:**

- Podmínky zatěžování: teplota, rychlost a tvar součásti (napjatost, přítomnost vrubů)
- Struktura oceli (chemické složení, velikost zrna, další strukturní součásti)

## Tranzitní lomové chování

**Změna charakteru lomu oceli – z tvárného lomu na lom štěpný v závislosti na poklesu teploty.**

# Tranzitní lomové chování



## Tranzitní lomové chování

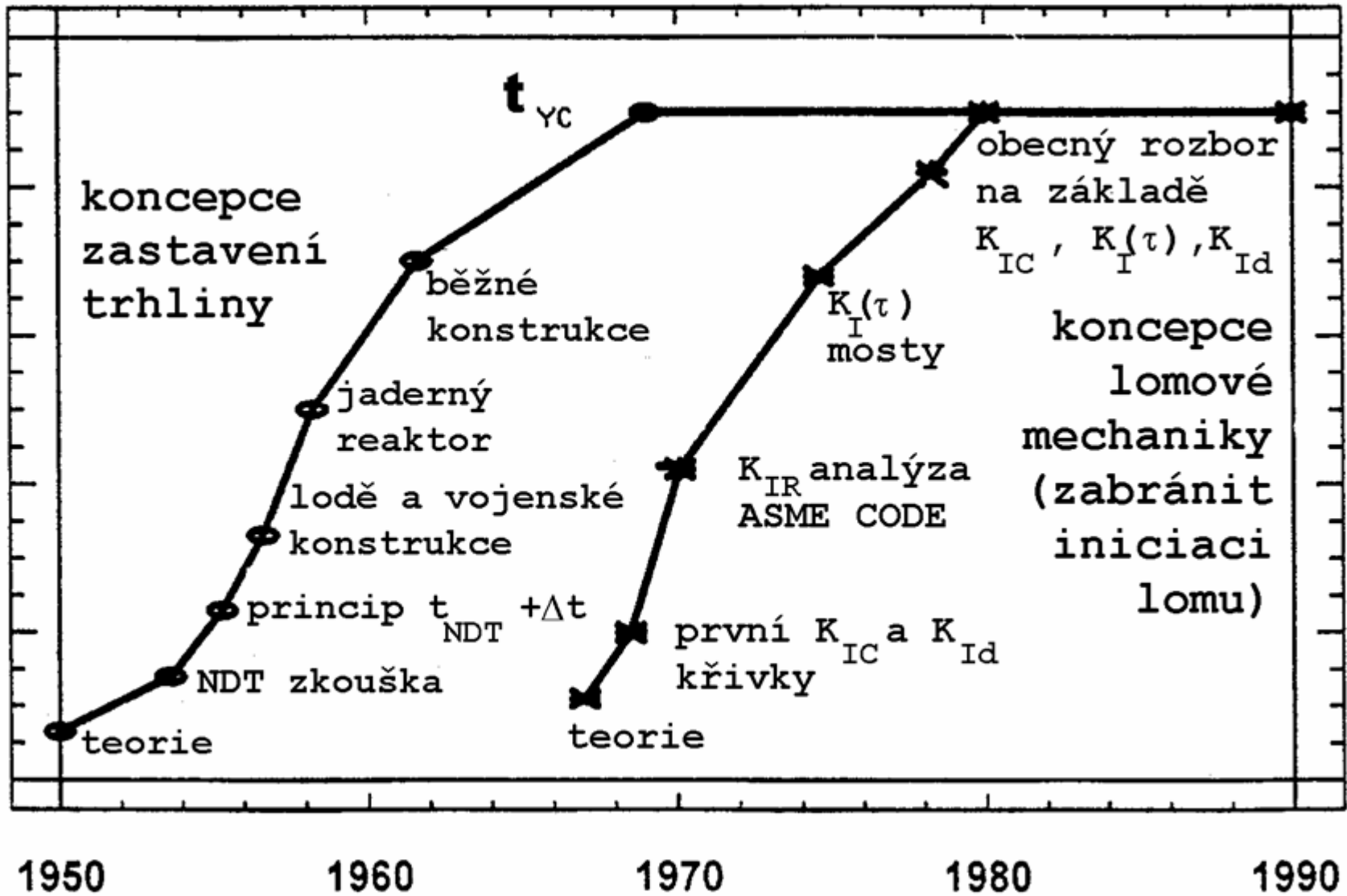
**Změna charakteru lomu oceli – z tvárného lomu na lom štěpný v závislosti na poklesu teploty.**

**Jak zabránit havárii ocelové svařované konstrukce křehkým lomem**

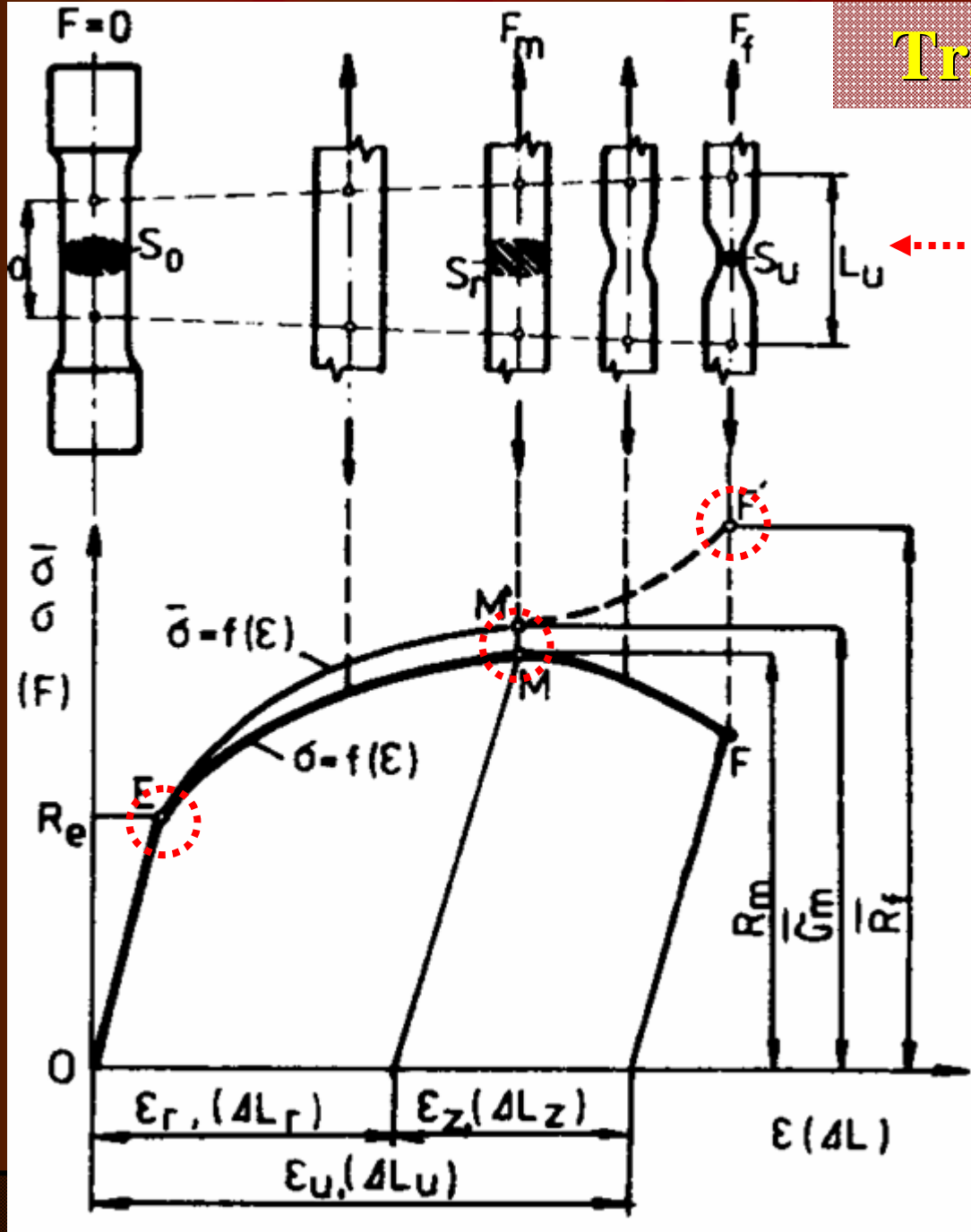
- **filosofie zastavení trhliny – tranzitní teplota**
- **filosofie zabránění iniciace lomu – lomová mechanika**



TECHNOLOGICKÝ POKROK



# Tranzitní lomové chování



$Z$

$\sigma_{fr}$

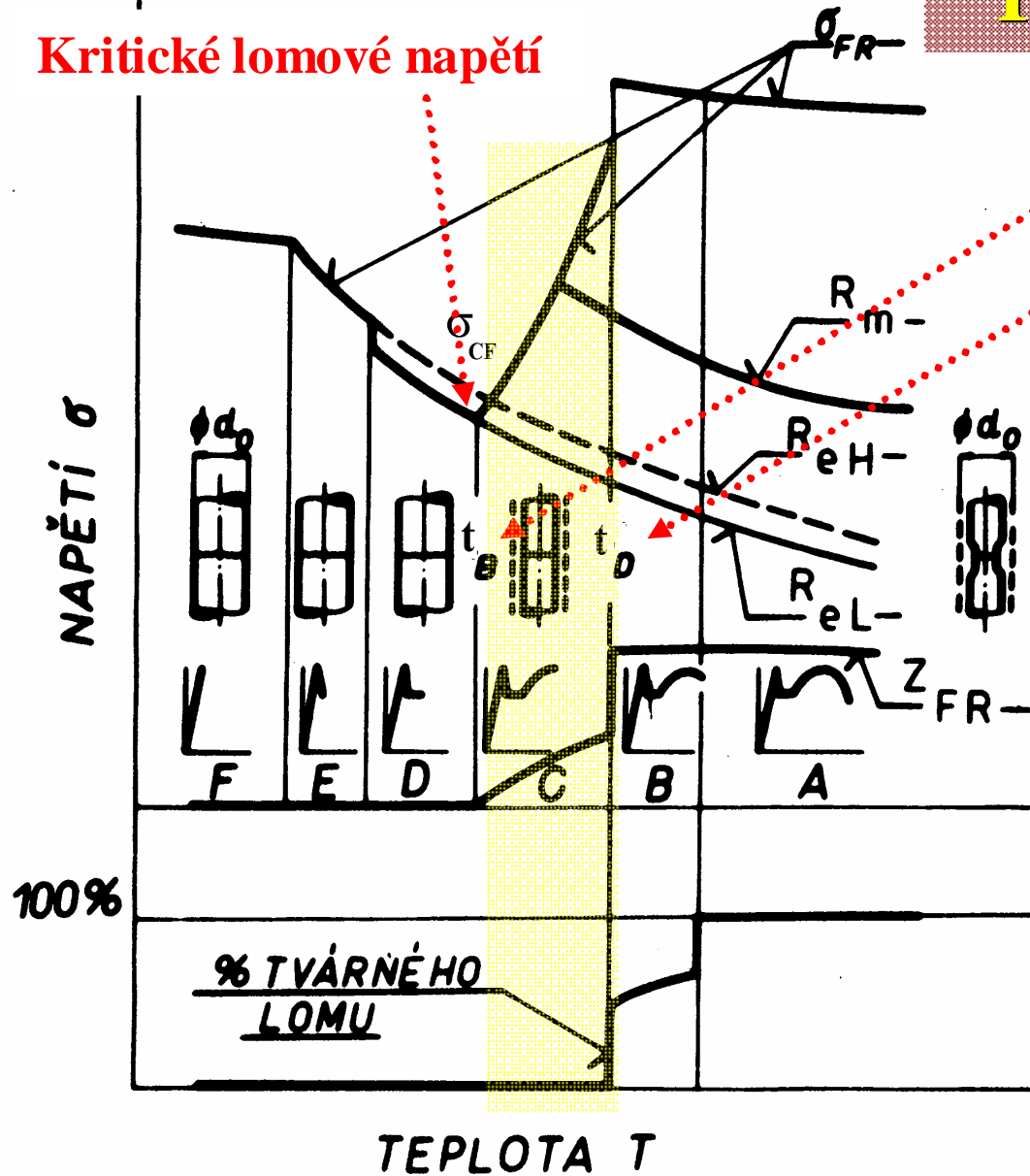
$R_m$

$R_e$



# Tranzitní lomové chování

Kritické lomové napětí

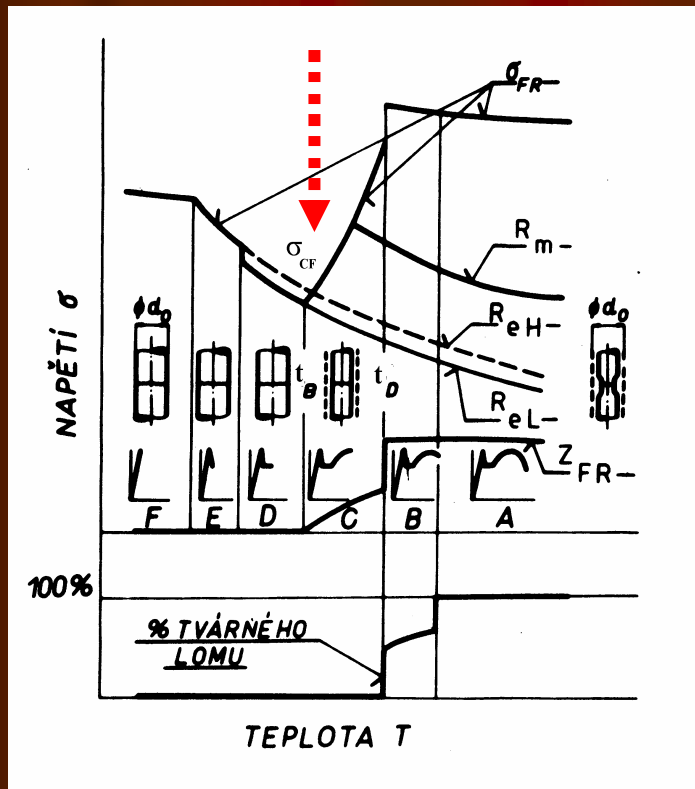


$t_B$  – teplota křehkosti

$t_D$  – teplota tvárnosti

- A. Tvárný lom (houževnatý)
- B. Smíšený lom
- C. Štěpný lom
- D. Křehký lom
- E. Křehký lom
- F. Křehký lom

## Kritické lomové napětí



Ocel	$R_e/R_m$ při $+20^\circ\text{C}$	d (mm)	$\sigma_{CF}$ (MPa)
11 368	248 / 377	0,024	880
11 523	335 / 531	0,019	920
13 030	317 / 482	0,015	1030

**Nejnižší lomové napětí v celé přechodové křivce při (kritické) teplotě křehkosti  $t_B$**

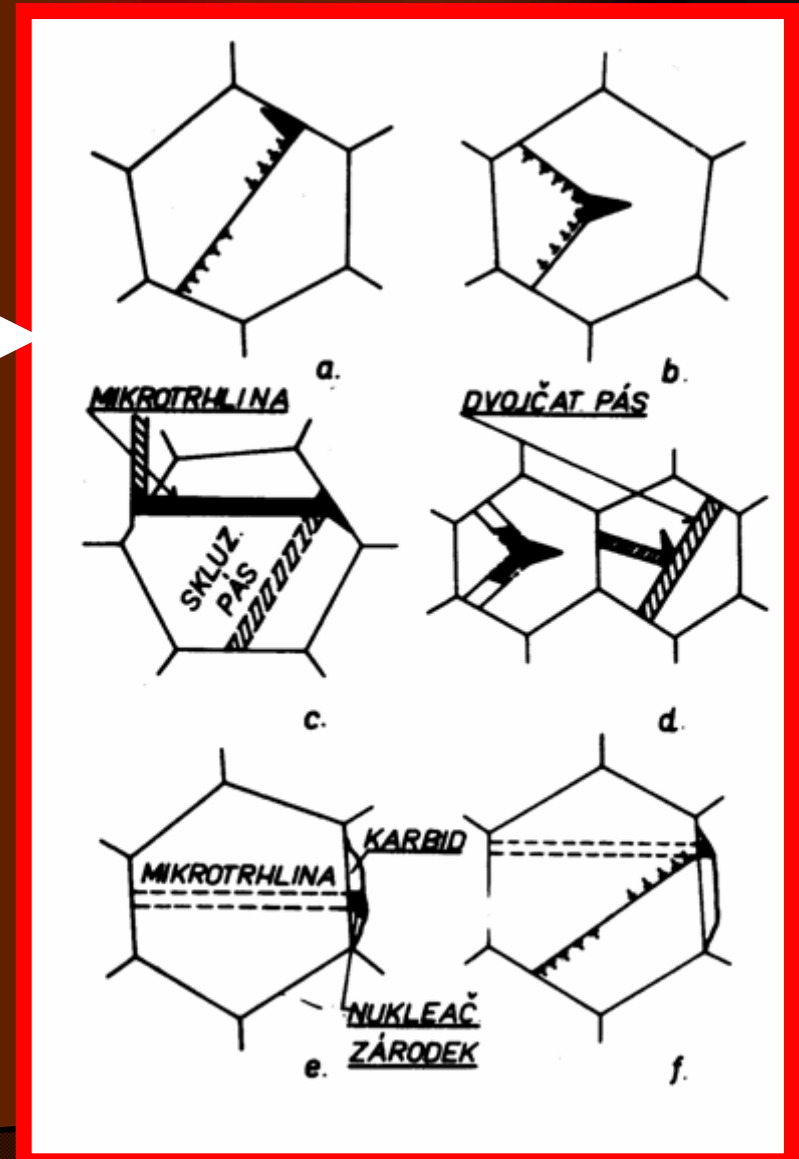
jeho velikost závisí na typu oceli (struktura) –  
materiálová charakteristika s fyzikálním významem

je menší než teoretická pevnost  $\tilde{\sigma} = E/8$  - neodpovídá  
tedy teorii (viz minulá přednáška)

# Kritické lomové napětí - štěpení

Štěpný lom nevzniká v oblasti elastických deformací - lomu vždy předchází plastická deformace (dolní/horní mez kluzu, dvojčatění)

První podmínka nutná pro vznik štěpného lomu je plastická deformace (není to však podmínka postačující !)



## Kritické lomové napětí - štěpení

K růstu zárodku štěpné mikrotrhliny je **nutné tahové napětí** určité velikosti.

$$\sigma_{CF}(g) = R_e = \frac{2G\nu \cdot \gamma_m}{k_y} d^{-1/2}$$

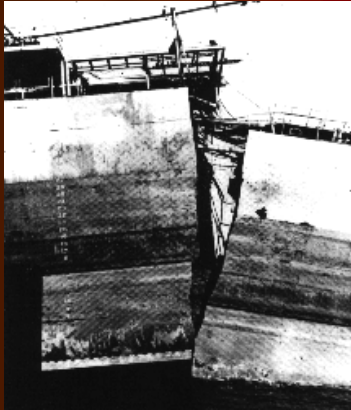
Druhá podmínka vzniku štěpného lomu (šíření zárodků štěpné trhliny) dosažení kritického lomového napětí.

$$\nu = \frac{2\tau_{\max}}{\sigma_1}$$

- ☞ kritické lomové napětí je menší než kohezivní (teoretická) pevnost
- ☞ hodnota  $\sigma_{CF}$  závisí na struktuře oceli
- ☞ lomy nukleačně a propagačně kontrolované

## Problém !!!

Lodě **Liberty** praskaly za teplot blízkých teplotě normální a ne za teploty kapalného dusíku.



### PROČ ?

### VYSVĚTLENÍ:

Nárůst tahového napětí na hodnotu kritického lomového napětí je možný jednak

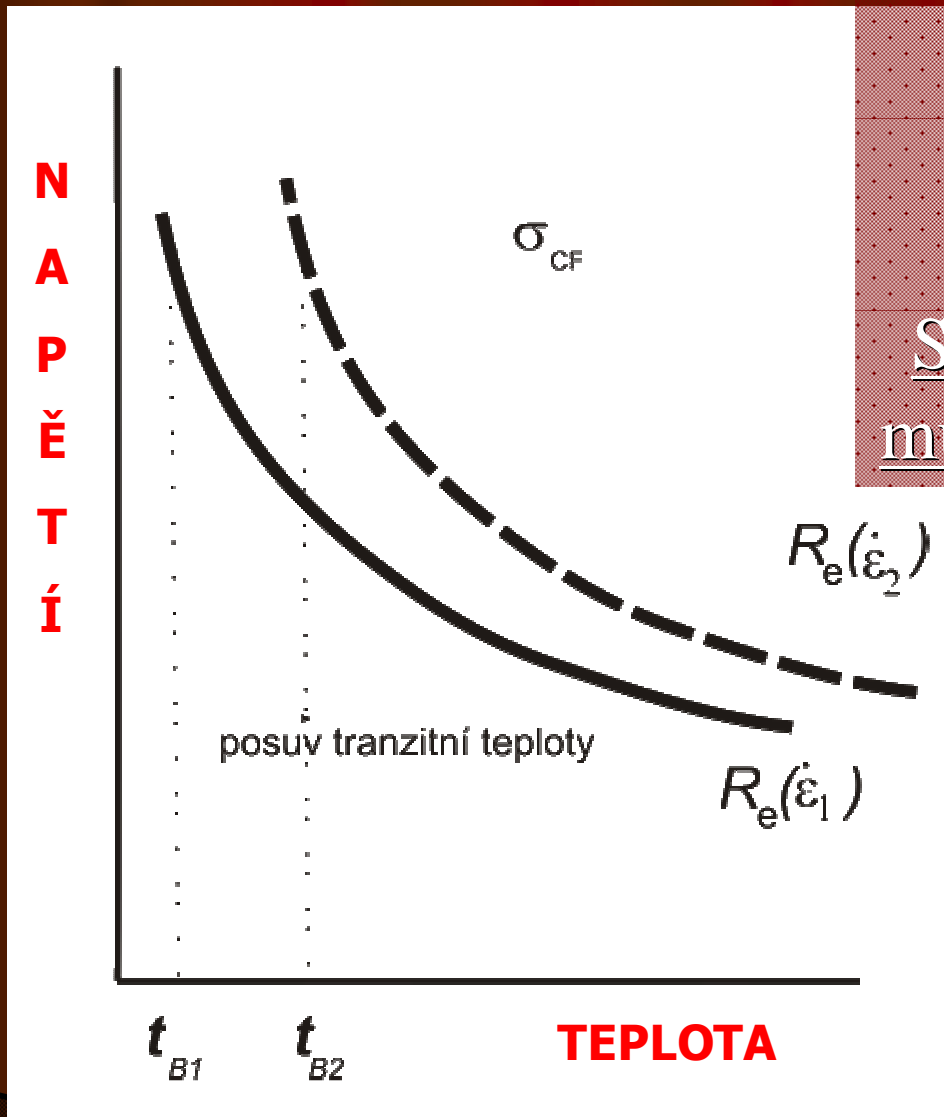
- Zvýšením rychlosti zatěžování
- Přítomností vrubů



## Vliv rychlosti zatěžování

Rychlost zatěžování posouvá tranzitní teplotu křehkosti směrem k vyšším teplotám !

S rostoucí rychlostí zatěžování můžeme očekávat zkřehnutí oceli



Přítomnost vrubů → napjatost

**Teoretický součinitel koncentrace napětí**  $k_t = \alpha$  vyjadřuje lokalizaci napětí v kořeni vrubu při elastické deformaci

$$k_t = \frac{(\sigma_{yy})^{\max}}{\sigma_n}$$

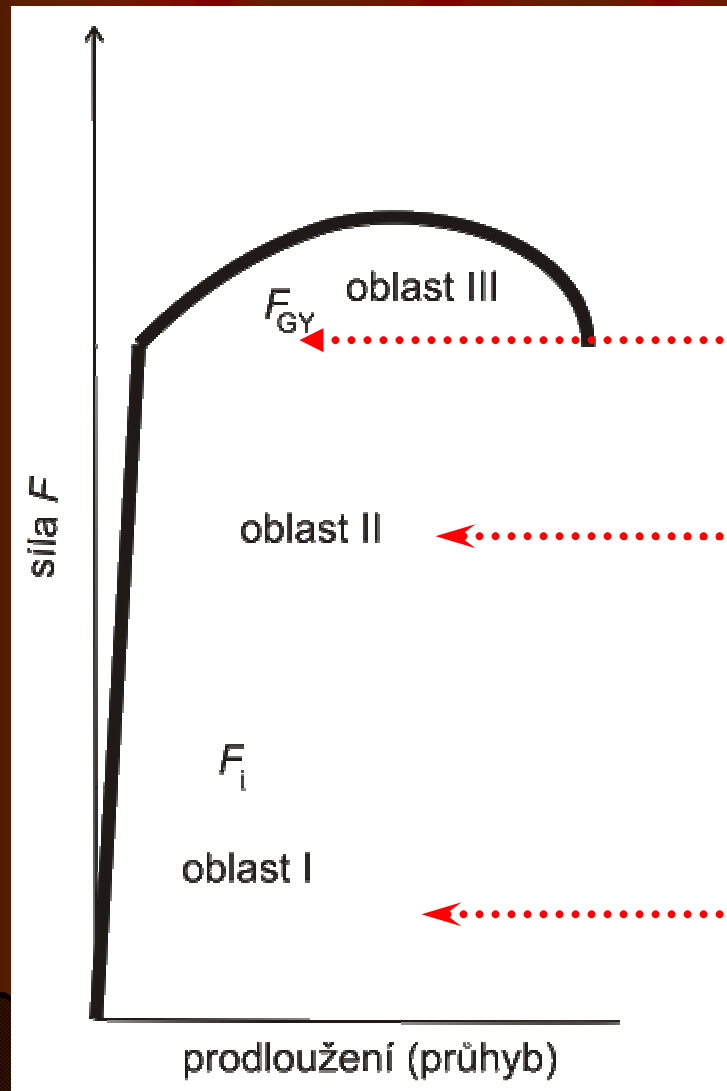
**Plastický součinitel koncentrace napětí** vyjadřuje lokalizaci napětí v kořeni vrubu při lokální plastické deformaci

$$k_{\sigma_{pl}} = \frac{\sigma_{yy}}{R_e}$$

# lokální plastická deformace vs. makroplastická deformace

## Vliv vrubů

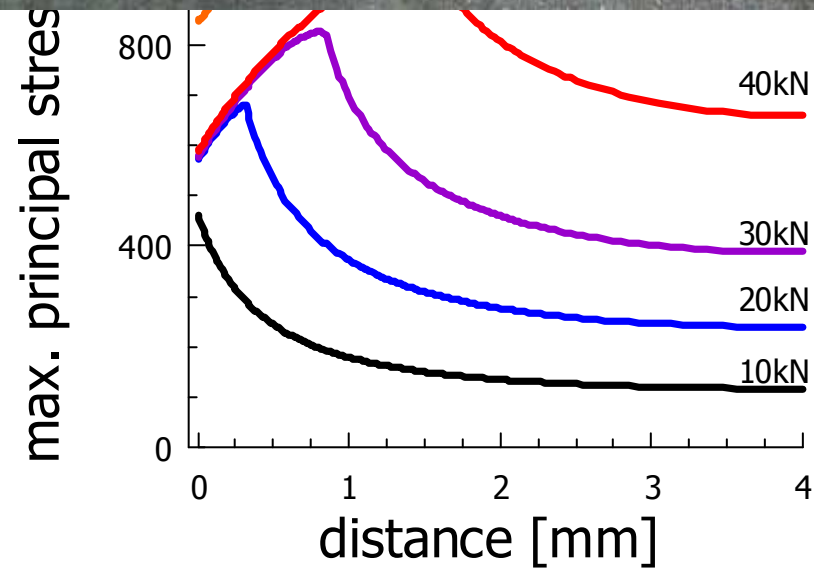
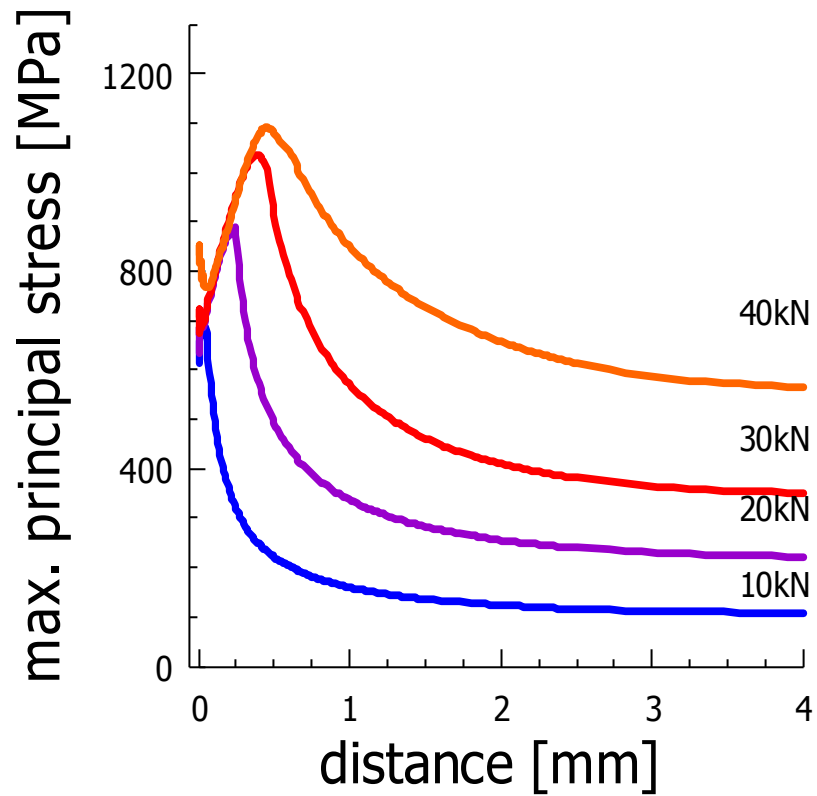
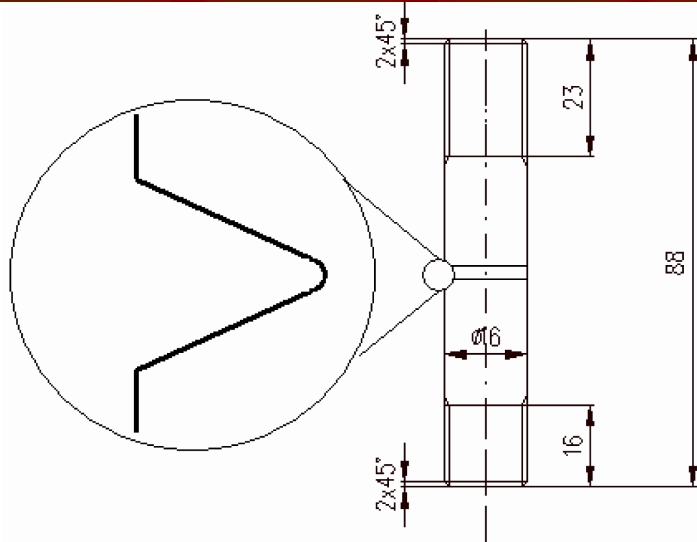
### Zatížení tělesa s vrubem



$$k_{\sigma pl}^{\max} = \frac{(\sigma_{yy})^{\max}}{R_e}$$

$$k_{\sigma pl} = \frac{\sigma_{yy}}{R_e}$$

$$k_t = \frac{(\sigma_{yy})^{\max}}{\sigma_n}$$



# napětí v kořeni vrubu při lokální plastické deformaci

## Vliv vrubů

### Zatížení tělesa s vrubem

např. je-li  $\omega \rightarrow 0$ , pak

$$k_{\sigma_{pl}}^{\max} = 2,75$$

$$k_{\sigma_{pl}} = \frac{\sigma_y}{R_e}; \quad k_{\sigma_{pl}}^{\max} \frac{(\sigma_y)^{\max}}{R_e} = \left( 1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\omega}{2} \right)$$

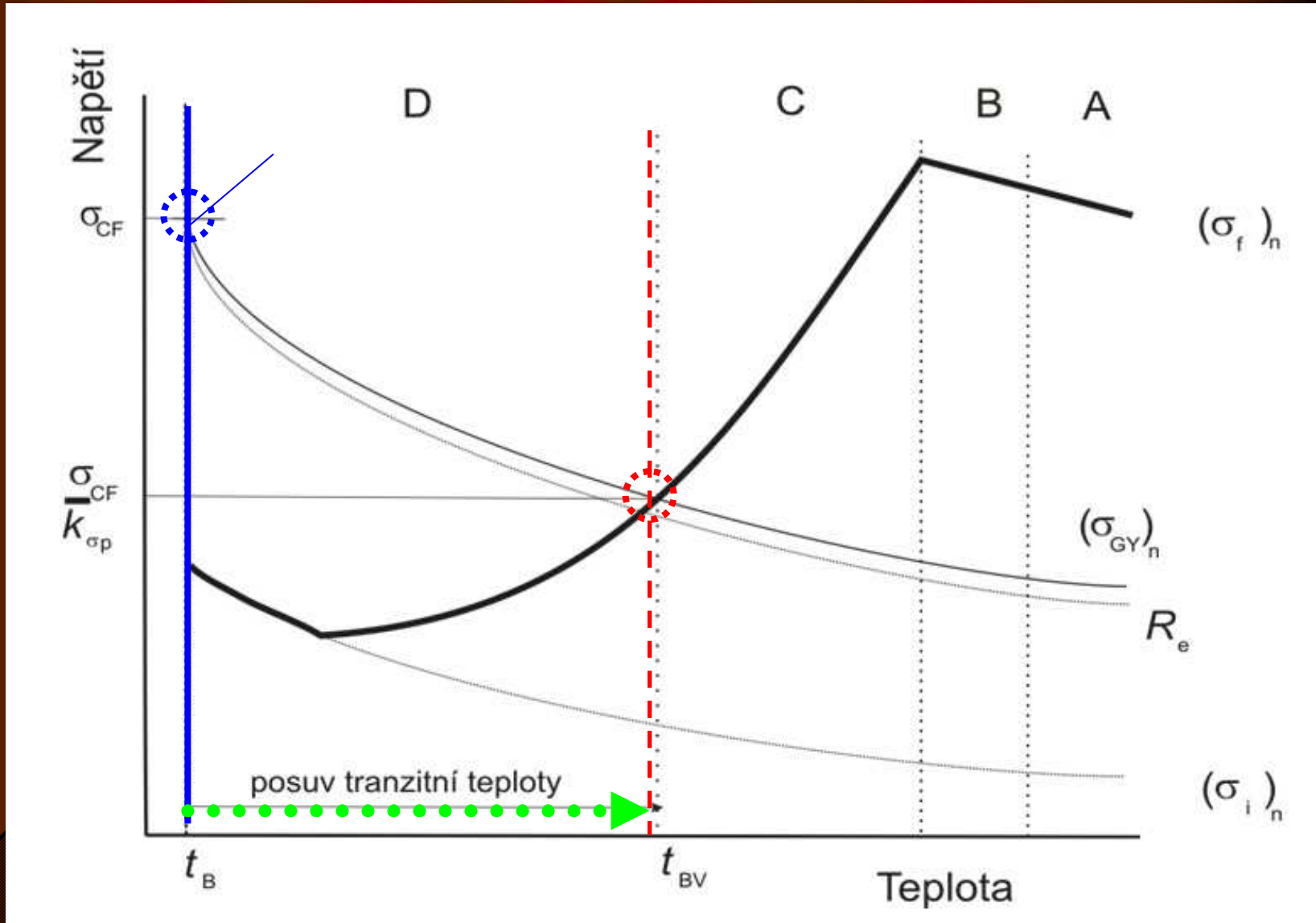
v plastické zóně působí tahové napětí, jehož velikost může být téměř 3x větší než  $R_e$ . K navýšení dochází v důsledku existence složky napětí  $\sigma_z = 1/2 (\sigma_x + \sigma_y)$  ve směru tloušťky.

plastický součinitel koncentrace napětí závisí na tloušťce stěny a tedy na  $\sigma_z$ .

pro tenký plech platí podmínky rovinné napjatosti,  $\sigma_z \approx 0$  <sup>37</sup>

# Kritické lomové napětí

vliv teploty na lomové chování těles s ostrým vrubem

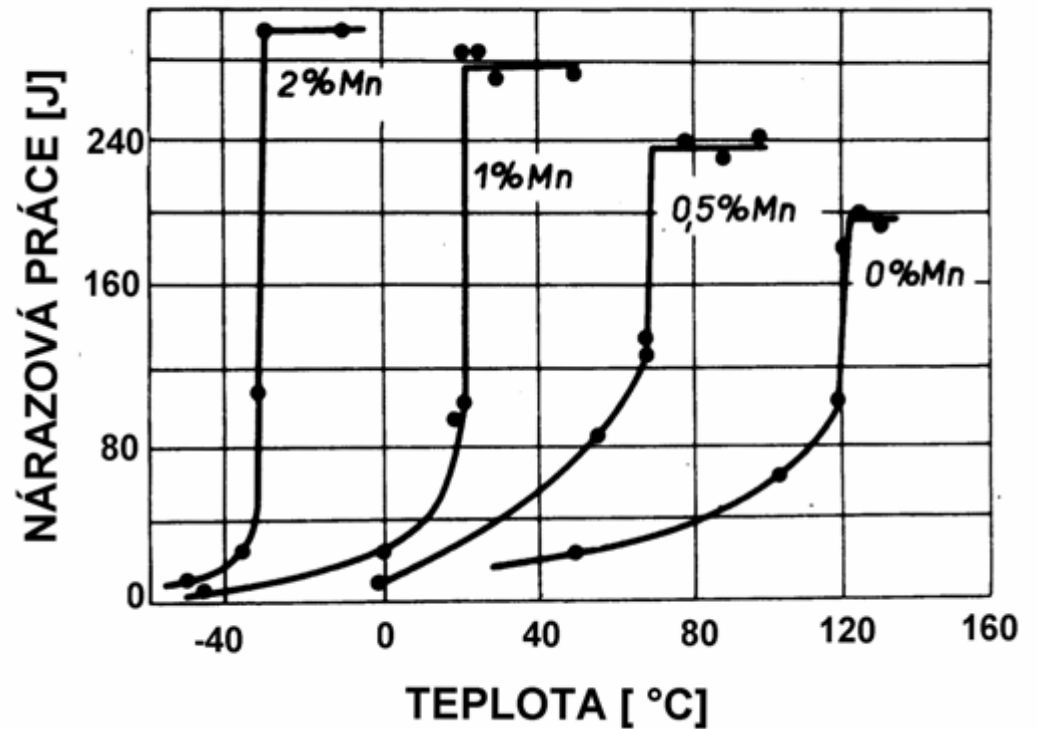
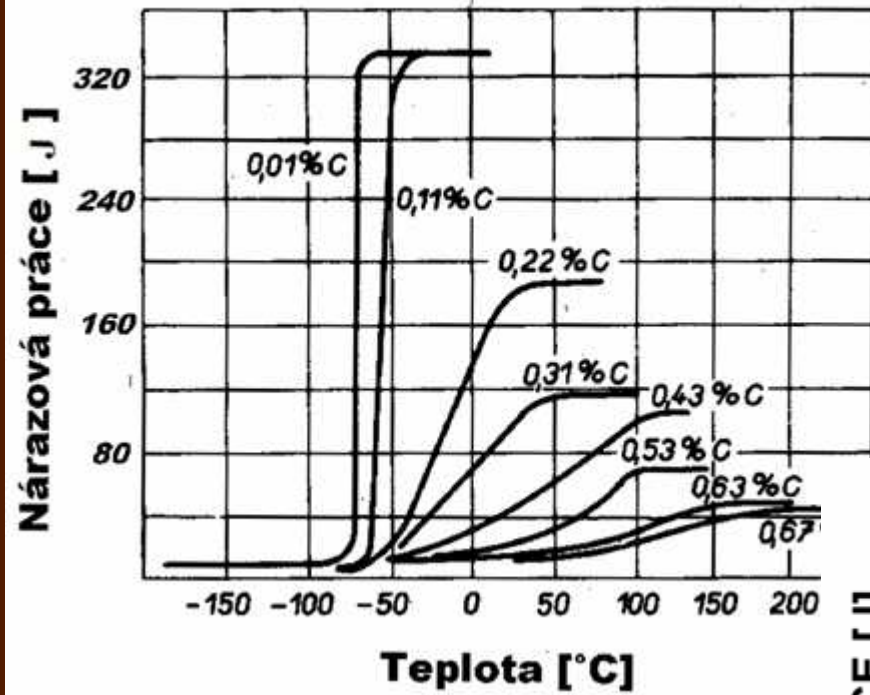


## Kritické lomové napětí

Kritické lomové napětí určuje odolnost oceli vůči křehkému lomu nejen při jednoosém tahu ale i v případě součástí s vruby (trhlinami).

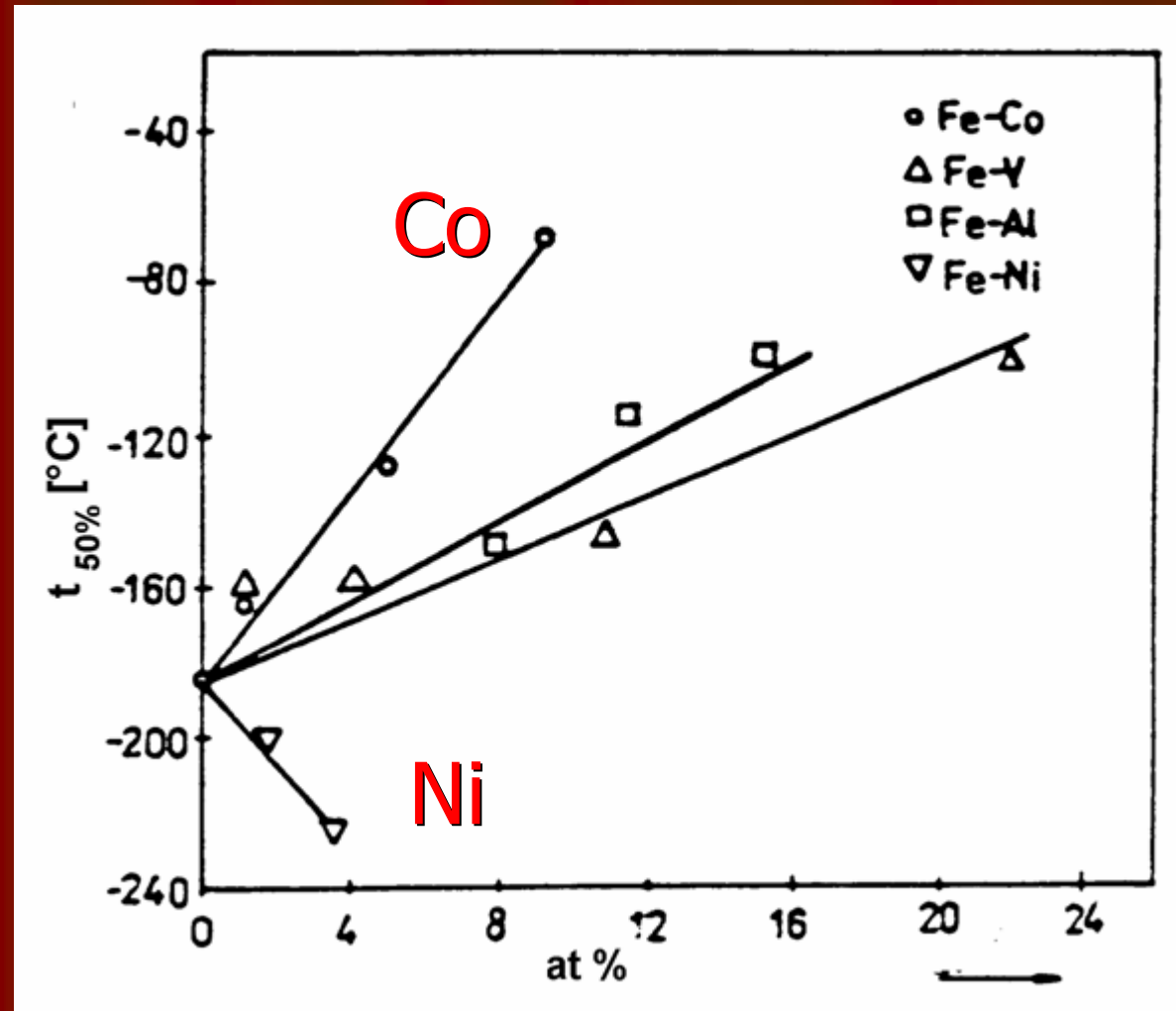
Vysvětlení: při síle  $F$  ( $F_i > F > F_{GY}$ ) existuje pod vrubem malá plasticky deformovaná oblast, ve které působí tahové napětí  $\sigma_y$ , které je větší, případně rovno kritickému lomovému napětí  $\sigma_{CF}$ .

# Vliv struktury na TLCh





# Vliv legujících prvků na TLCh



# Nelegované konstrukční oceli - TLCh

Ocel	$R_e$ (MPa)	$T_{27J}$ (°C)	
Neleg Mn - C	200 – 400	-40 až – 10	11 378
Mikroleg NŽ	250 – 520	-80 až -20	11 523; 11 503
Mikroleg ŘV	350 – 650	-80 až -20	
Kalicí lis (bainit)	550 – 820	- 60 až + 20	

# Nízkolegované oceli k zušlechtění - TLCh

- prac. teploty – 50°C až – 150°C
- legury 1,5% Ni, 0,15% Cr, 0,1% Mo
- 13 221, 16 222, 16 370

## Vysokolegované oceli - TLCh

- Kryogenní teploty  $-150^{\circ}\text{C}$  až  $-196^{\circ}\text{C}$
- nízkouhlíkový martenzit  
(0,04 až 0,14)%C, (5 až 13)% Ni
- Podskupinu tvoří oceli typu  
COR 13/4; 13/6 (Cr/Ni)

## Austenitické oceli

- mají fcc strukturu a tedy nemají tranzitní lomové chování
- Cr-Ni austenitické oceli (18 – 20)% Cr, (8 – 14)% Ni 17 241 až 17 341
- Mn-Cr austenitické oceli (18 – 22)% Mn, (9 – 14)% Cr 17 481

# Houževnatost

- i. Základní pojmy (tranzitní lomové chování ocelí, teplotní závislost pevnostních vlastností, fraktografie)**
- ii. (Empirické) zkoušky houževnatosti (Charpy, TNDT)**
- iii. Lineárně-elastická lomová mechanika (Irwin, zkoušky lomové houževnatosti)**
- iv. Elasto-plastická lomová mechanika (zkoušky, interpretace, podmínky šíření trhliny)**