

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

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

Jak zabránit havárii ocelové svařované konstrukce křehkým lomem ?

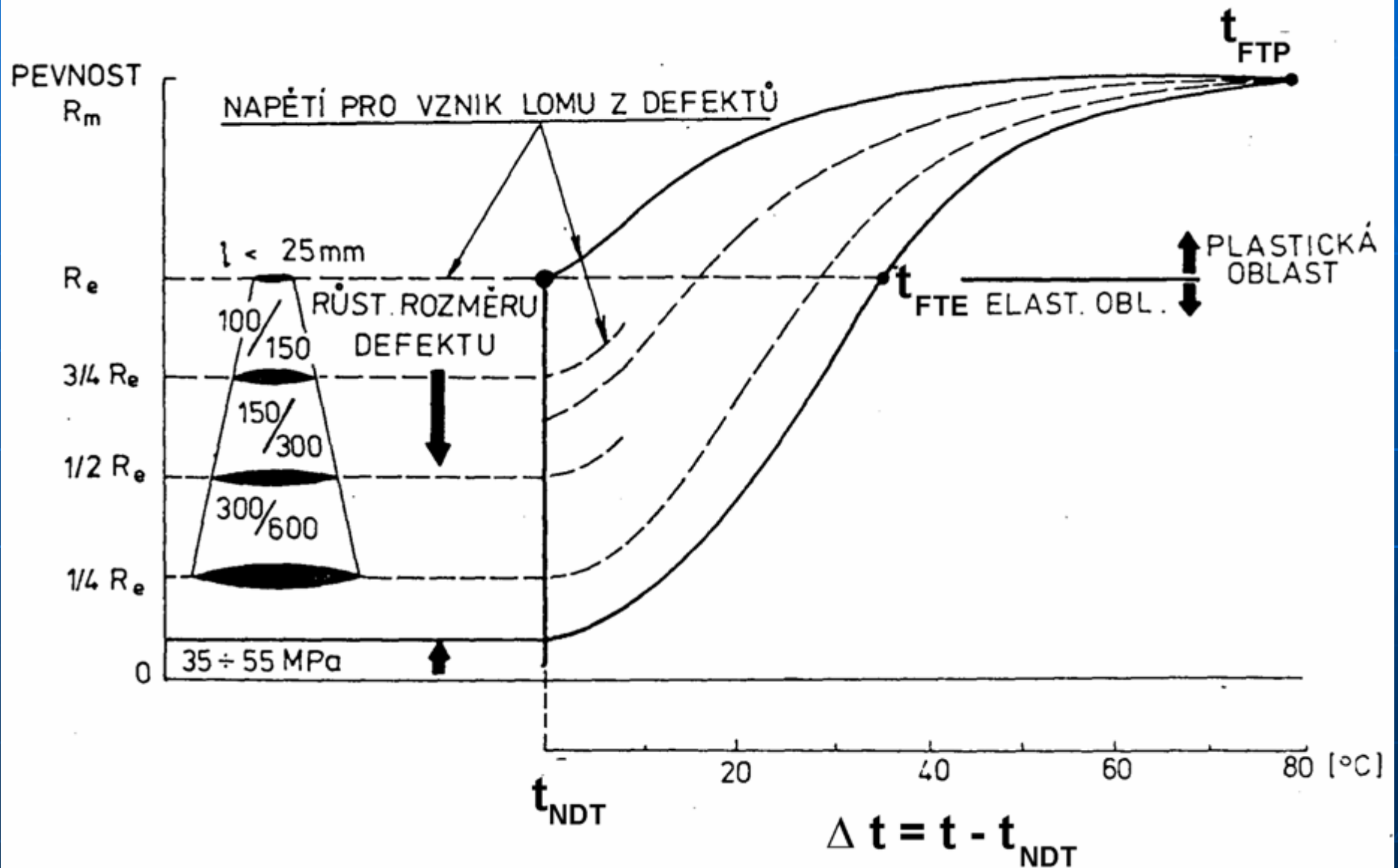
- filosofie zastavení trhliny

– tranzitní teplota

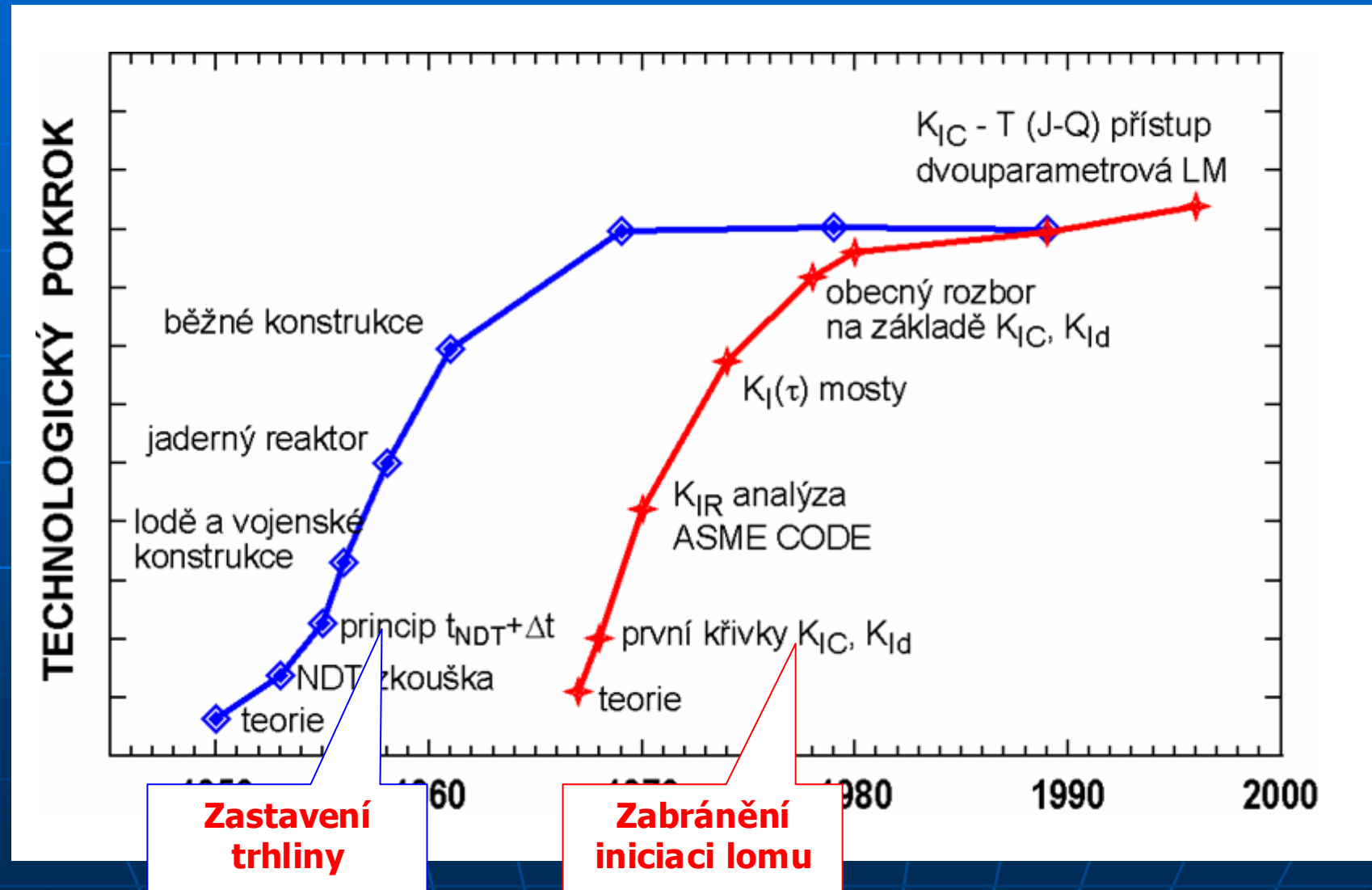
- filosofie zabránění iniciace lomu

– lomová mechanika

Lomový diagram podle Pelliniho



Změna koncepce

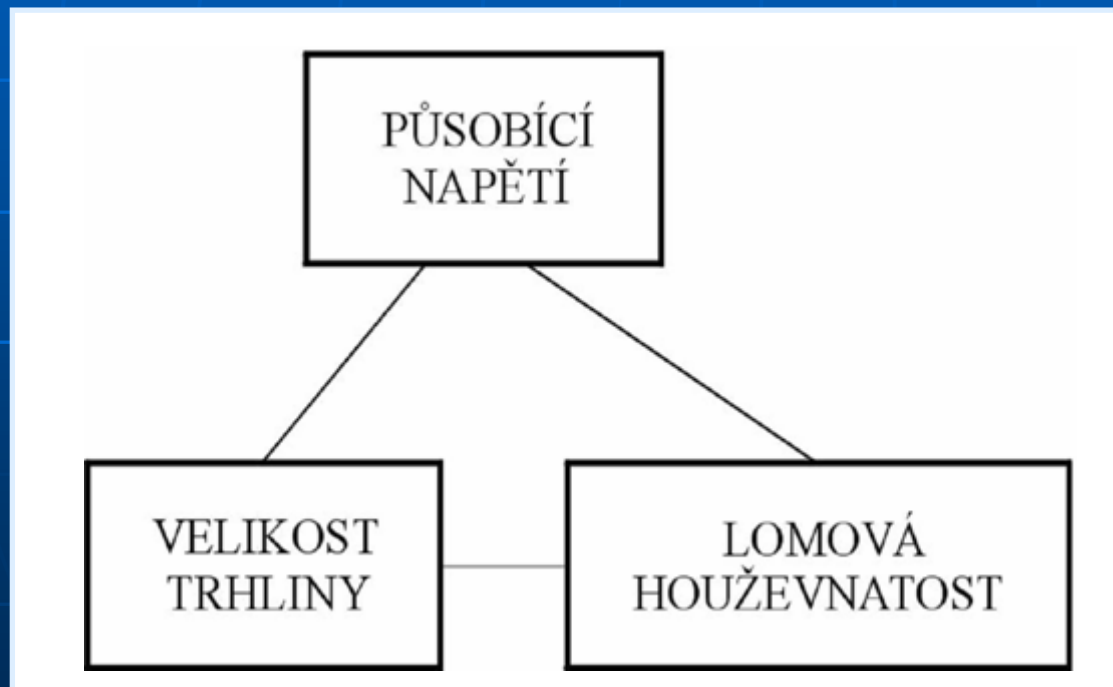
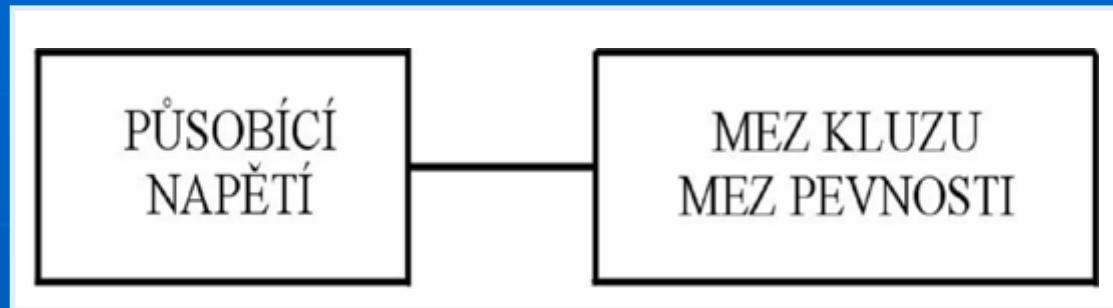


Změna koncepce

Lodě Liberty aj. - příčiny:

- ✓ zbytková napětí (svar)
- ✓ definice tranzitních teplot
- ☞ koncentrátoři napětí

(svar, metalurgické vady)

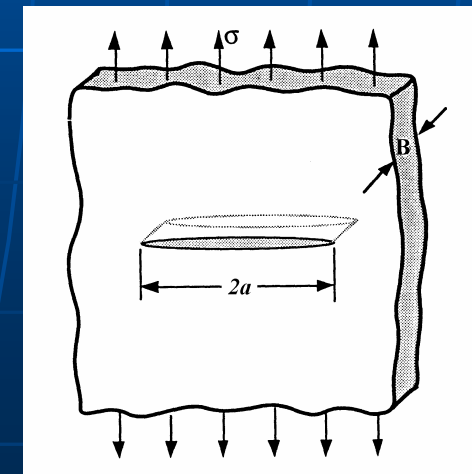


Δt - bezpečnostní přídavek k t_t

Základy lomové mechaniky

Co to je lomová mechanika?

Lomová mechanika je vědní obor, který se zabývá mezním stavem součástí s trhlinami.



Základy lomové mechaniky

1) Úvod

2) Zatížené těleso s trhlinou – **energetická analýza** – **Griffith** – parametr **G**

3) Zatížené těleso s trhlinou – **napět'ová analýza** – **Irwin (Kinz)** – parametr **K**

Pevnost součásti s trhlinou

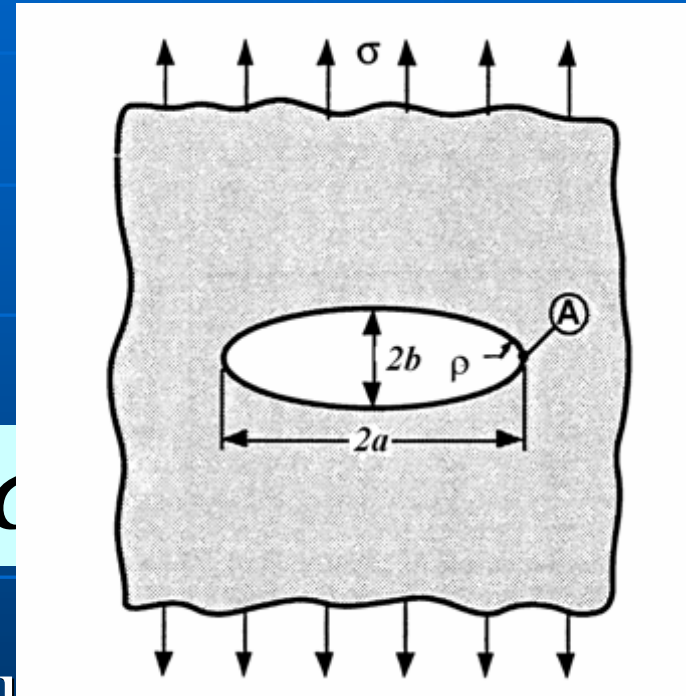
30 léta – Inglis – elastické řešení

$$\sigma_A = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

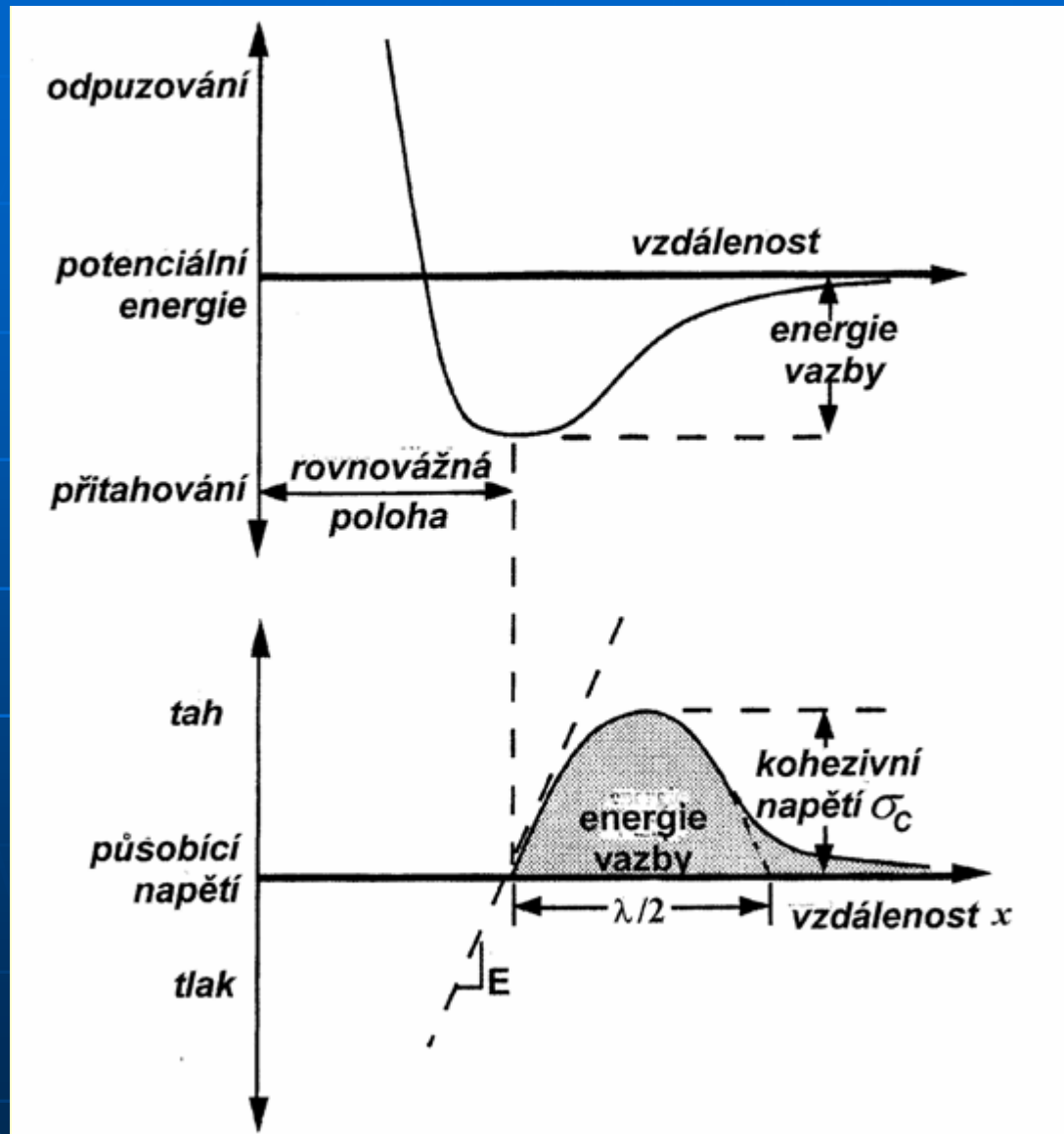
když $\rho \rightarrow 0$ pak $\sigma_A \rightarrow \infty$

Součást, která obsahuje trhlinu by se měla porušit při velice malém zatížení.

Zdánlivý paradox se vysvětlil až v 50. letech.



Odhad kohezivní pevnosti

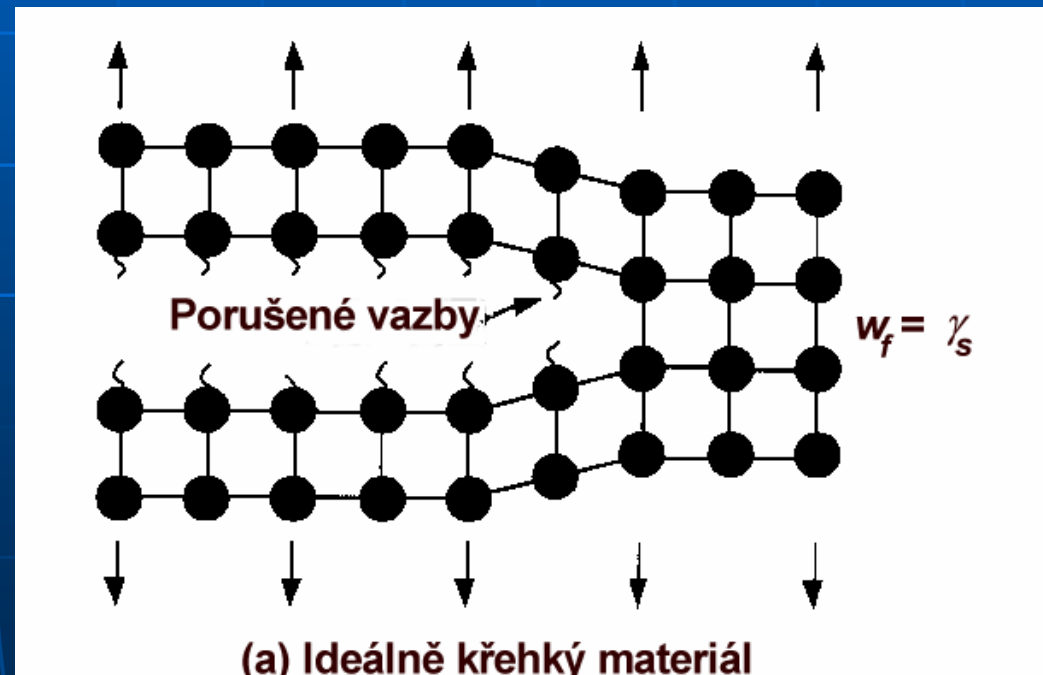


$$\sigma_c = \left(\frac{E \cdot \gamma_s}{a_0} \right)^{1/2} \quad [2]$$

Pevnost součásti s trhlinou

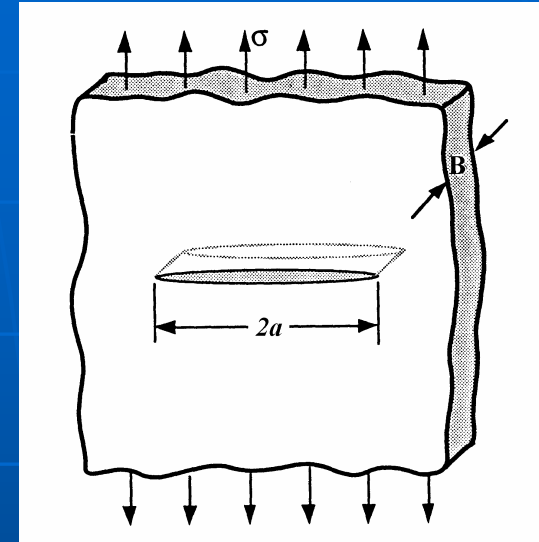
Materiál má krystalovou mřížku. Trhlina v materiálu nemůže být nekonečně ostrá.

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{E\gamma_s}{4a}}$$



Energetická kritéria - Griffith

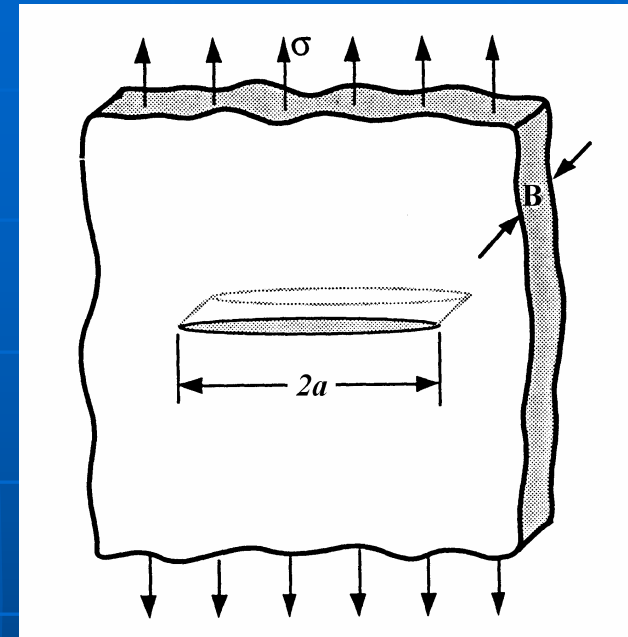
- nekonečně velká deska zatížená konstantním napětím
- energetická bilance (zákon zachování energie)
- práce spojená s přírůstkem lomové plochy uhrazena elastickou energií uvolněnou v okolí rostoucí trhliny



$$\frac{dW}{dA} = \frac{dW_{el}}{dA} + \frac{dW_s}{dA} \leq 0$$
$$-\frac{dW_{el}}{dA} = \frac{dW_s}{dA}$$

Energetická kritéria - Griffith

Při havárii křehkým lomem je práce spojená se vznikem lomu vykonána elastickou energií akumulovanou v konstrukci, tj. trhlina může vzniknout (růst) pouze tehdy jestliže tento proces způsobí, že celková energie systému zůstane konstantní, nebo se zmenší.



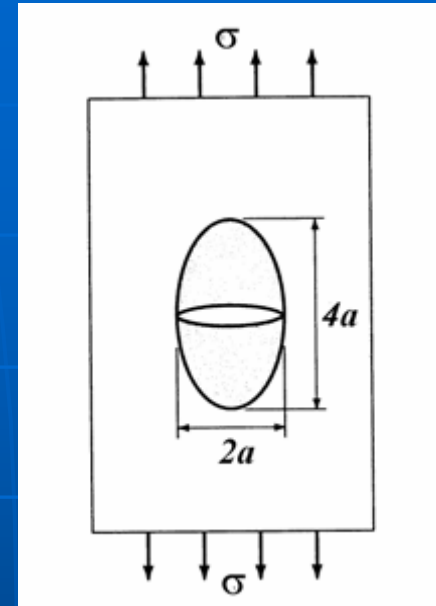
K lomu součásti dojde v případě, že uvolněná elastická energie při šíření trhliny je schopna vyvolat vznik nových povrchů.

Energetická kritéria - Griffith

$$\frac{dW}{dA} = \frac{dW_{el}}{dA} + \frac{dW_s}{dA} \leq 0$$

[4]

$$-\frac{dW_{el}}{dA} = \frac{dW_s}{dA}$$

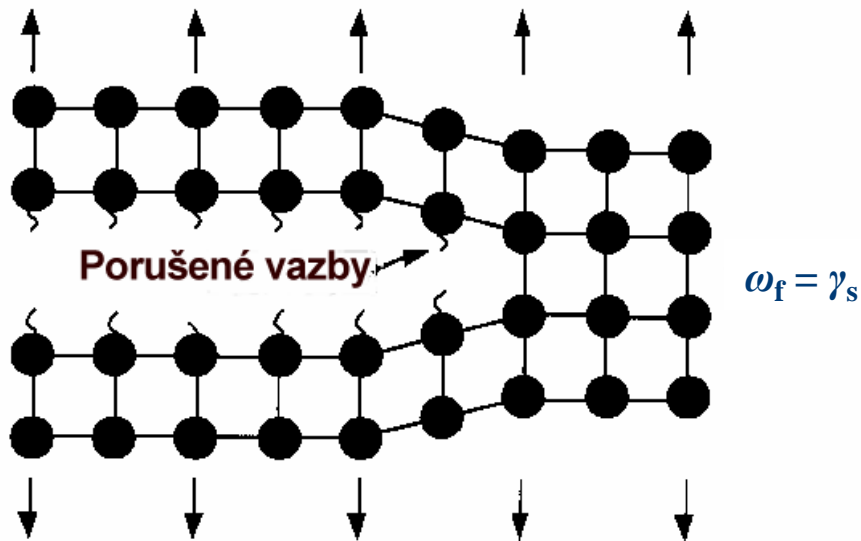


$$W_{el} = -\frac{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma^2 \cdot B}{E}$$

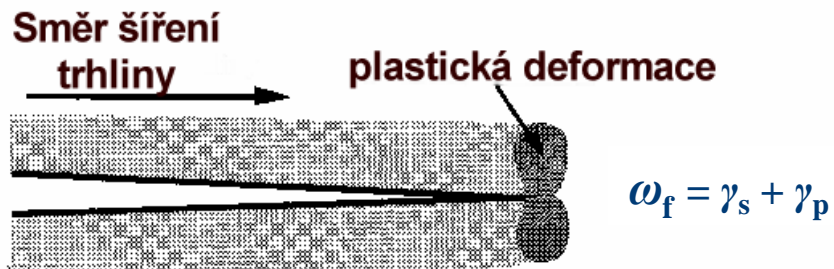
$$W_s = 2 \cdot 2 \cdot a \cdot B \cdot \gamma_s$$

$$\sigma_f = \left(\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a} \right)^{1/2}$$

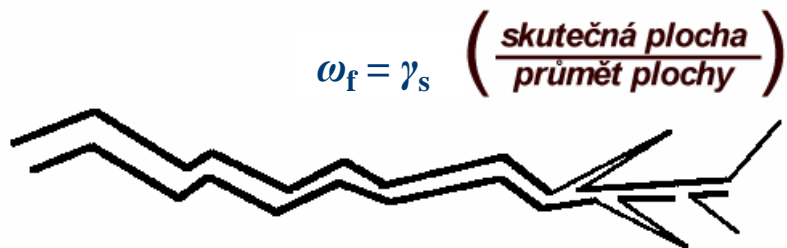
Energetická kritéria – Griffith-Orowan



(a) Ideálně křehký materiál



(b) Kvazikřehký elasticko-plastický materiál



$$\sigma_f = \left(\frac{2 \cdot E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a} \right)^{1/2}$$

$$\sigma_f = \left(\frac{2E\omega_f}{\pi a} \right)^{1/2}$$

$$\sigma_f = \left(\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi \cdot a} \right)^{1/2}$$

Energetická kritéria – Griffith-Orowan

Jak tuto teorii použít k výpočtům?

(Irwinova modifikace Griffithovy teorie)

$$G = -\frac{dW_{el}}{da}$$
$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \left[\frac{(MPa)^2}{MPa} m = \frac{MNm}{m^2} \right] \quad [7]$$

MJ

m²



rychlost uvolňování energie
energy release rate

MN

m



hnací síla trhliny
crack driving force

Energetická kritéria – Griffith-Orowan

Jak tuto teorii použít k výpočtům?

(Irwinova modifikace Griffithovy teorie)

$$\frac{dW_s}{da} = 2\omega_f = 2(\gamma_s + \gamma_p)$$

[8]

$2\omega_f$



G_c - lomová houževnatost materiálu



R - křivka - odpor materiálu vůči lomu

Energetická kritéria - Irwin

HNACÍ SÍLA TRHLINY G

rychlost uvolňování energie (rychlost změny potenciální energie v závislosti na růstu lomové plochy)

$$G = -\frac{dW_{el}}{dA} \quad G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad \left[\frac{(MPa)^2}{MPa} m = \frac{MJ}{m^2} = \frac{MN}{m} \right]$$

ODPOR MATERIÁLU PROTI ŠÍŘENÍ R

rychlost vzrůstu povrchové energie s růstem lomových povrchů;
kritická hodnota – podmínka pro počátek šíření trhliny

$$R = \frac{dW_s}{dA} \quad R = 2(\gamma_s + \gamma_p) = G_C$$

HOUŽEVNATOST G_C

ODPOR MATERIÁLU PROTI ŠÍŘENÍ R

$$R = \frac{dW_s}{dA} \quad R = 2(\gamma_s + \gamma_p) = G_C$$

HOUŽEVNATOST G_C

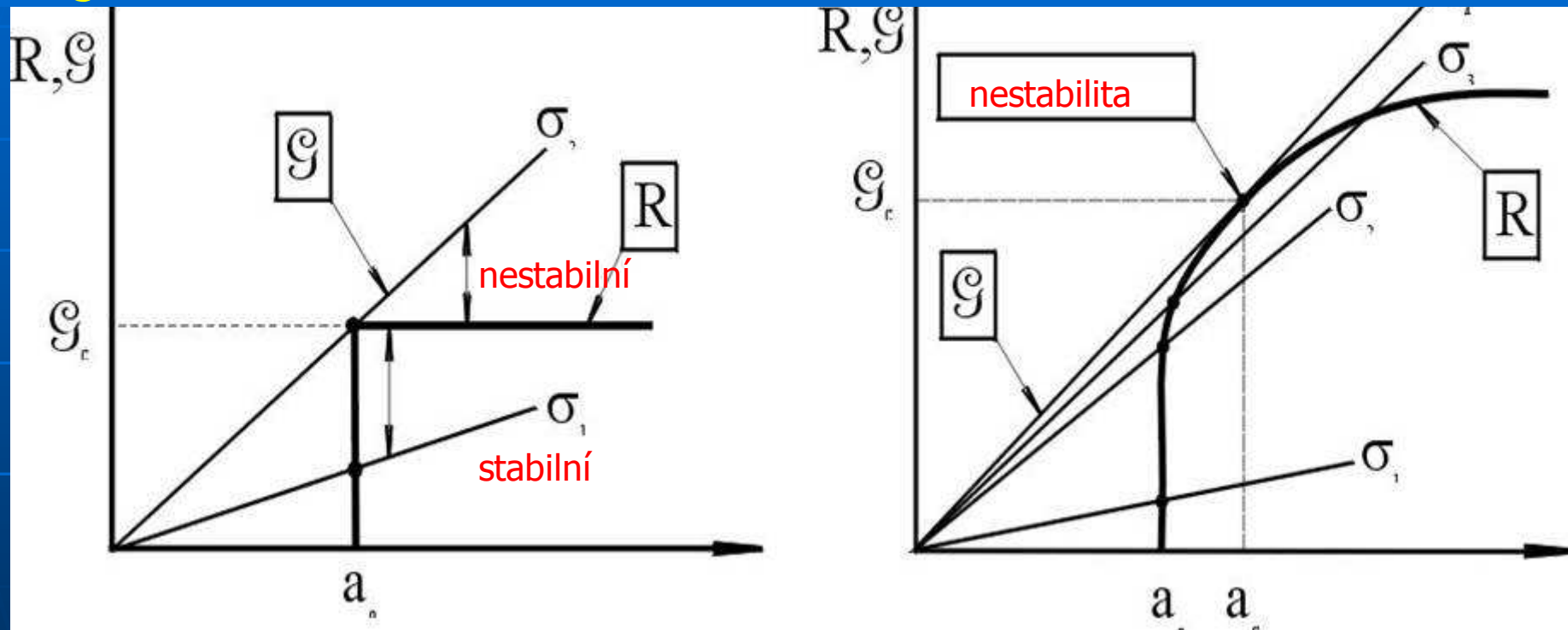
Analogie s mezí kluzu:
deformace nastane je-li
lom nastane je-li

$$\sigma_{\text{nom}} > R_{p0,2}$$
$$**G > G_C**$$

Energetická kritéria - Irwin

tvár křivky – inherentní vlastnost materiálu

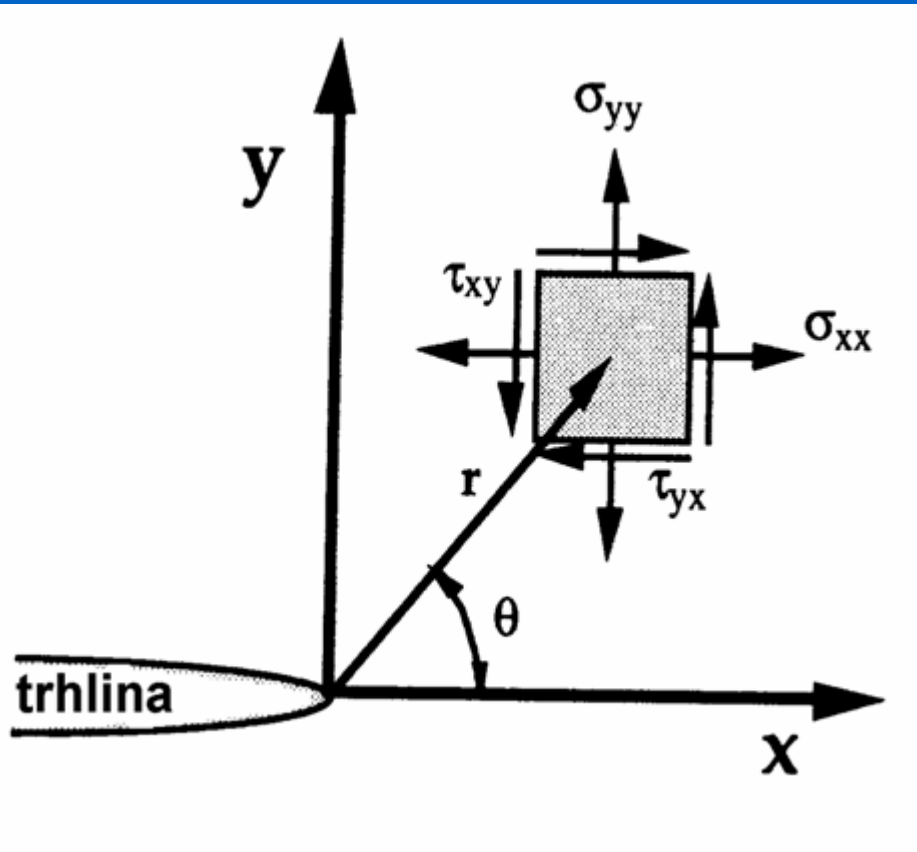
G_C – materiálová vlastnost (lomová houževnatost)



stabilní šíření trhliny – trhlina se nešíří, pokud neroste zátěžná síla

nestabilní šíření – trhlina se šíří samovolně, bez nutnosti dalšího zatěžování

Napět'ová kritéria - Irwin



r a θ - polární souřadnice

σ_{ij} - složky tenzoru napětí

k - konstanta

$f_{ij}(\theta), g_{ij}(\theta)$

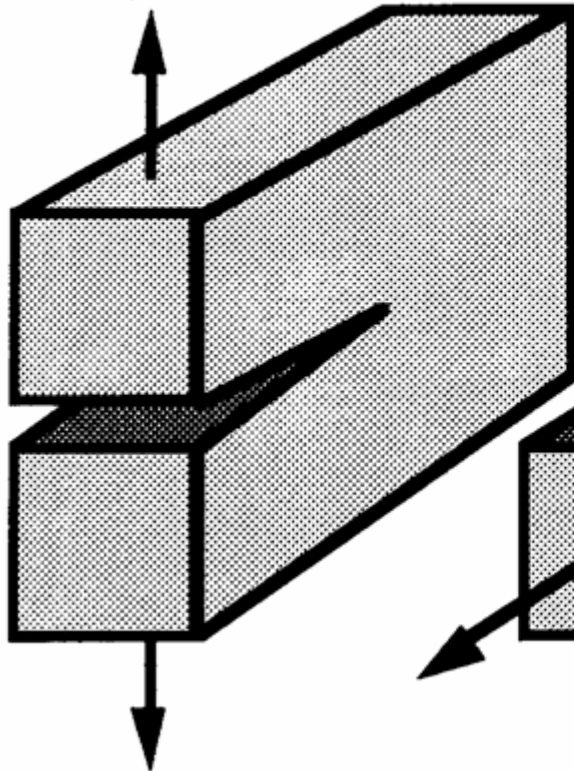
- bezrozměrné veličiny
(funkcí úhlu θ)

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) \cdot f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cdot r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta)$$

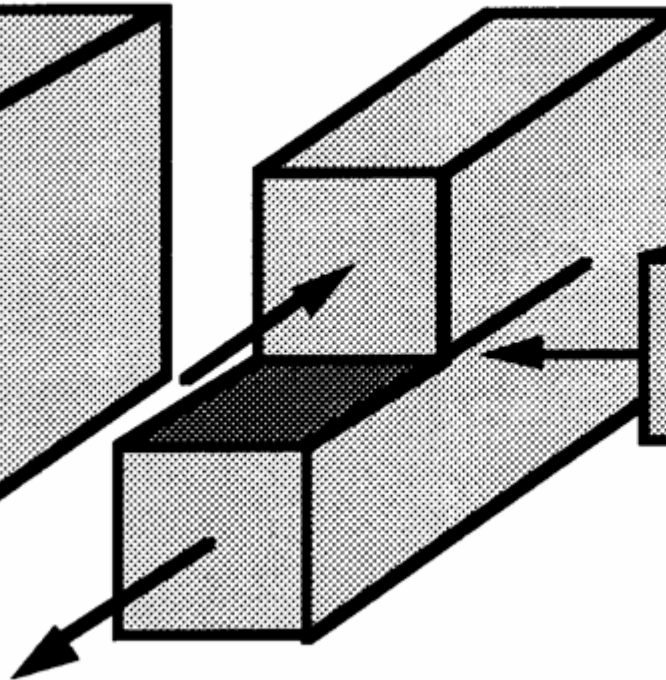
Napět'ová kritéria - Irwin

Způsob zatěžování

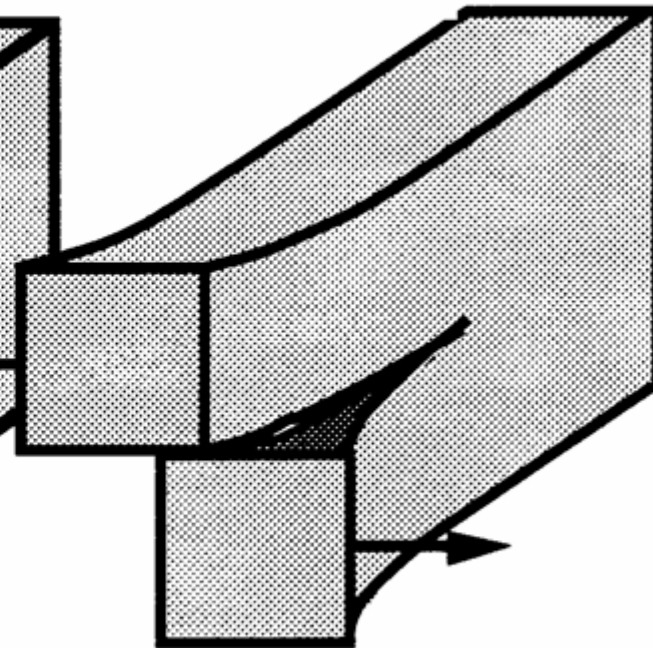
I.(rozevírání)



II.(smyk)

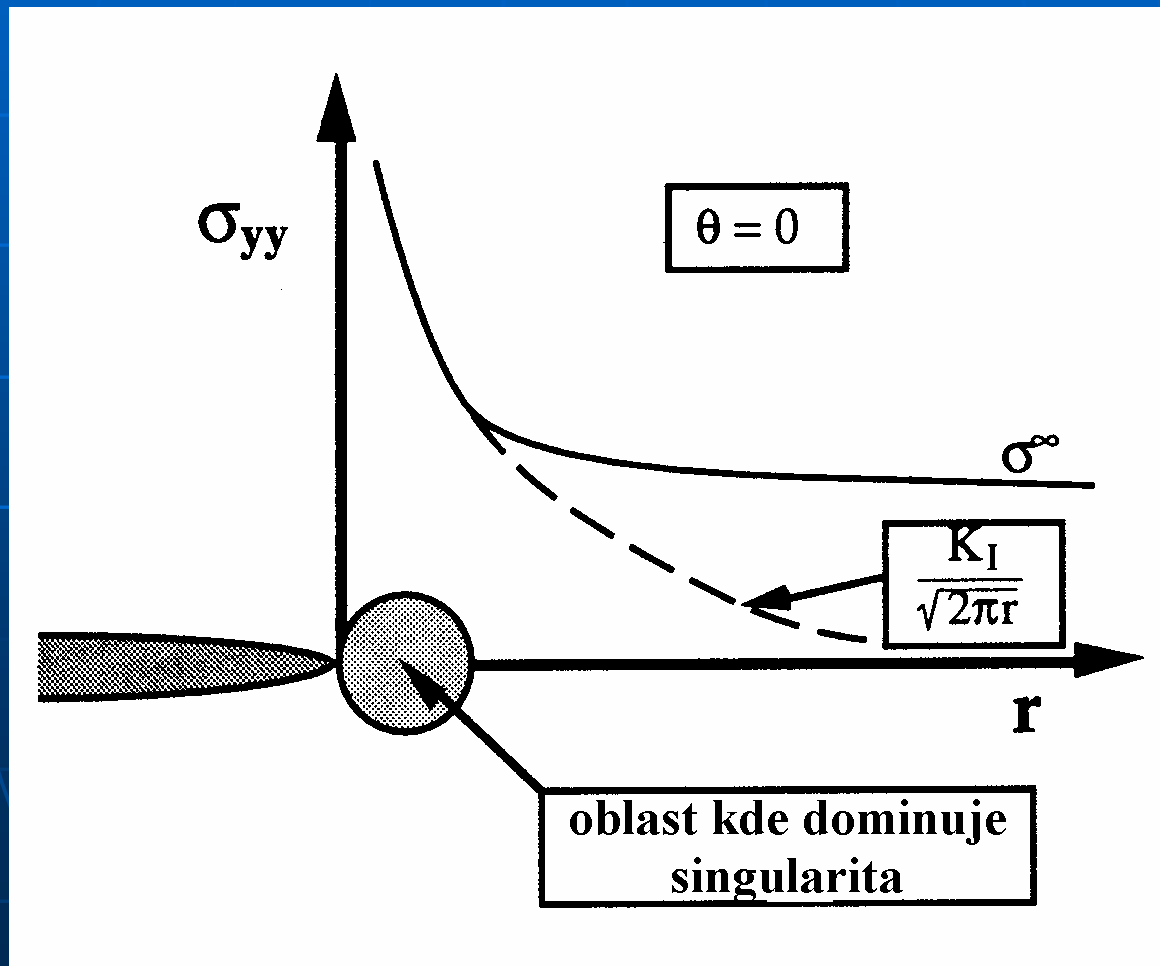


III.(střih)



Napět'ová kritéria - Irwin

Protože lom vznikne v blízkosti čela trhliny budeme se zajímat o tuto oblast



Napět'ová kritéria - Irwin

Součinitel (faktor) intenzity napětí

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) \cdot f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cdot r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta)$$

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) \cdot f_{ij}(\theta)$$

$$K_I = k \cdot \sqrt{2\pi}$$

Napět'ová kritéria - Irwin

Napět'ová pole před čelem trhliny pro Múd I a Múd II v lineárním elastickém a isotropním materiálu

	Múd I	Múd II
σ_{xx}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$	$-\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$
σ_{yy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$
τ_{xy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$
σ_{zz}	0(rovinná napjatost) $\mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (rovinná deformace)	0(rovinná napjatost) $\mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (rovinná deformace)
τ_{xz}	0	0
τ_{yz}		

Napět'ová kritéria - Irwin

Posunutí před čelem trhliny pro Mód I a Mód II v lineárním elastickém a isotropním materiálu

	Mód I	Mód II
u_x	$\frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 + 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$	$\frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 + 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$
u_y	$\frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 - 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$	$-\frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$

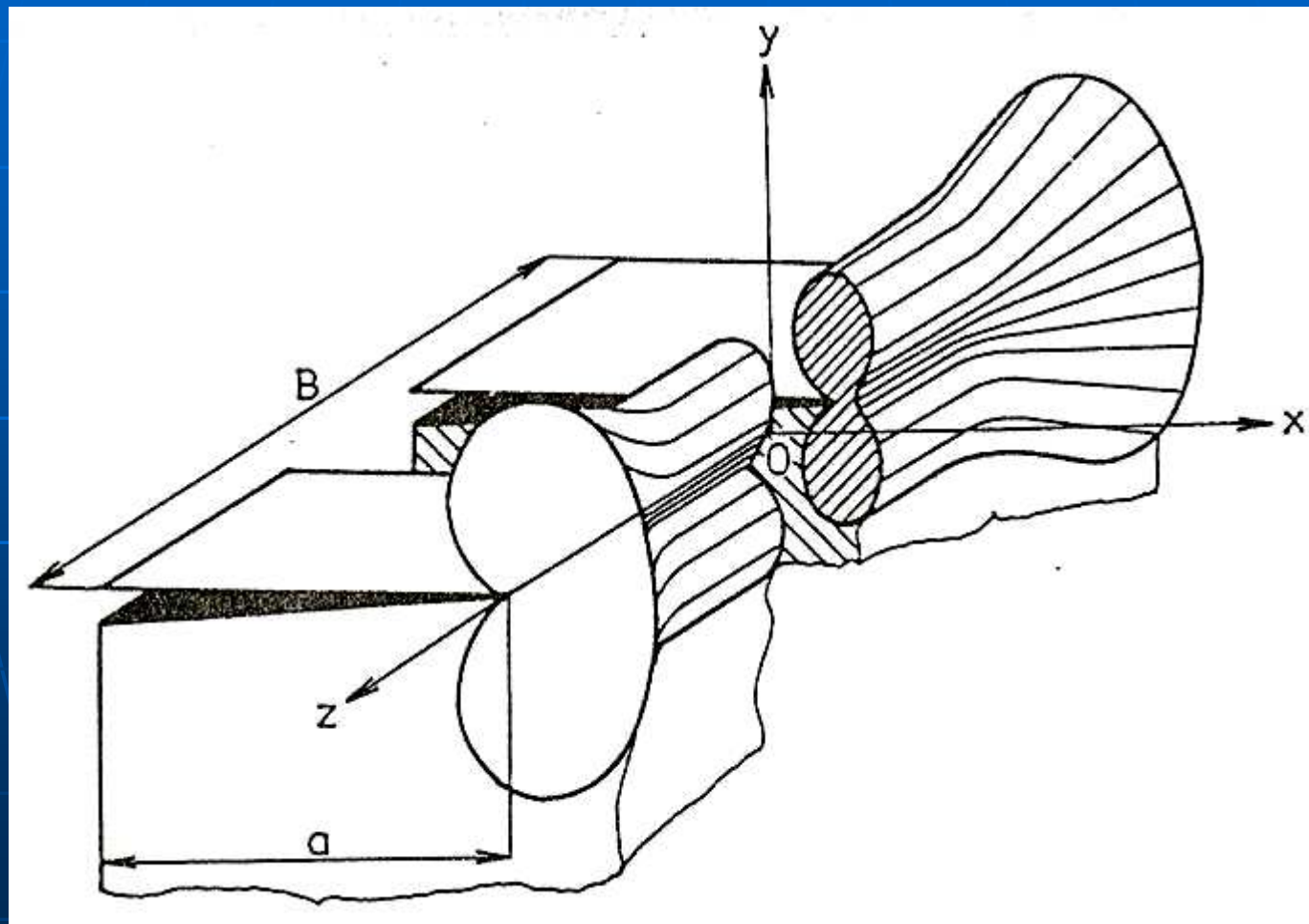
G je modul ve smyku, $\kappa = 3 - 4\mu$ (rovinná deformace), $\kappa = (3 - \mu)/(1 + \mu)$

Tab. 3 Složky nenulových napětí a posunutí v Módu III v lineárním elastickém a isotropním materiálu

$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$u_z = -\frac{K_{III}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$
--	---	--

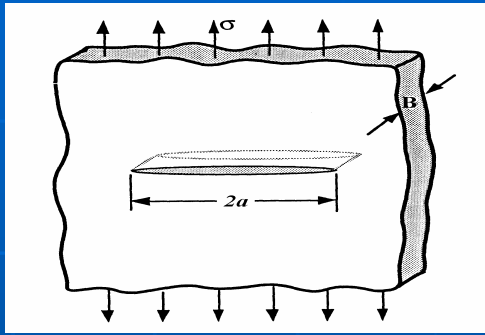
Napět'ová kritéria - Irwin

rovinné napětí vs. rovinná deformace

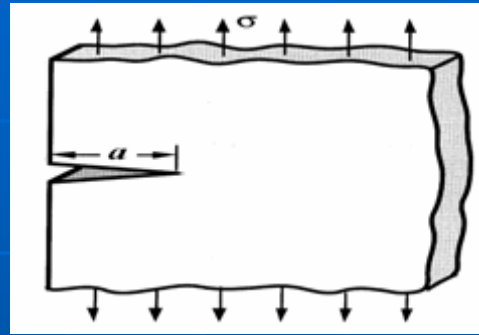


Napět'ová kritéria - Irwin

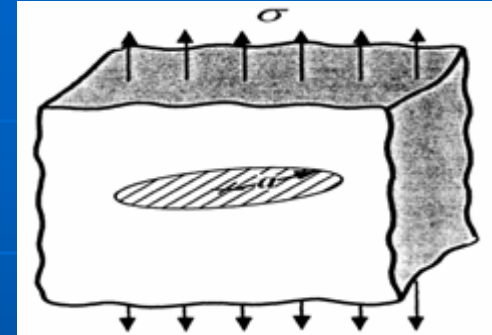
- základní řešení – příklady



$$K_I \approx \sigma$$



$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$$



$$K_I = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$$

- obecná řešení (tabelována)

$$K_I = \frac{F}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

B – tloušťka tělesa

W – rozměr tělesa ve směru šíření trhliny

a – délka trhliny

F – lomová síla

Napět'ová kritéria - Irwin

jednotky K_I

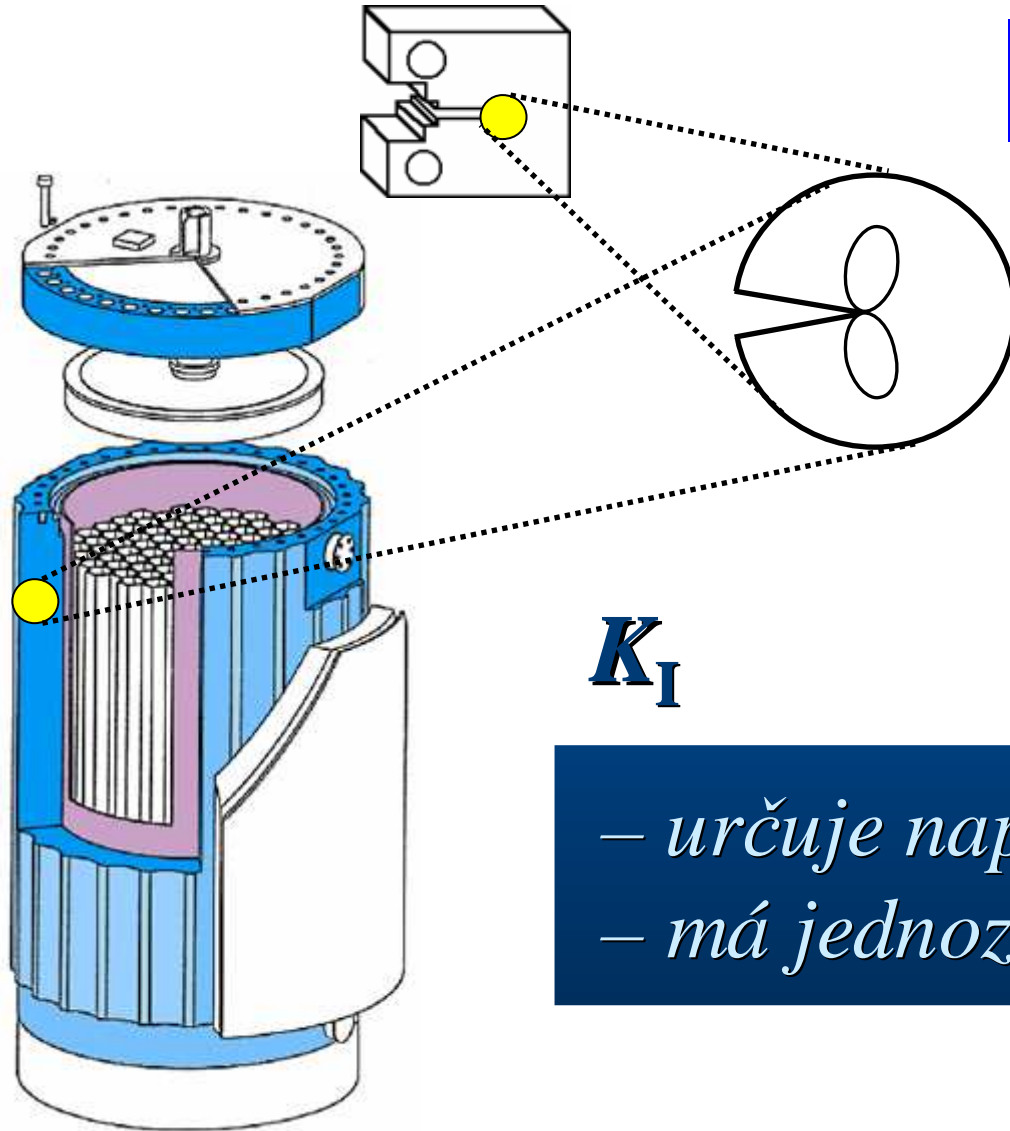
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad \text{MPa}\sqrt{\text{m}} = \text{MPa}\text{m}^{1/2} = \text{MPa}\text{m}^{0,5}$$

souvislost mezi G_C a K_{IC}

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad \longrightarrow \quad G = \frac{K_I^2}{E} \quad \longleftarrow \quad K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$$
$$G = \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2)$$

Napět'ová kritéria - Irwin

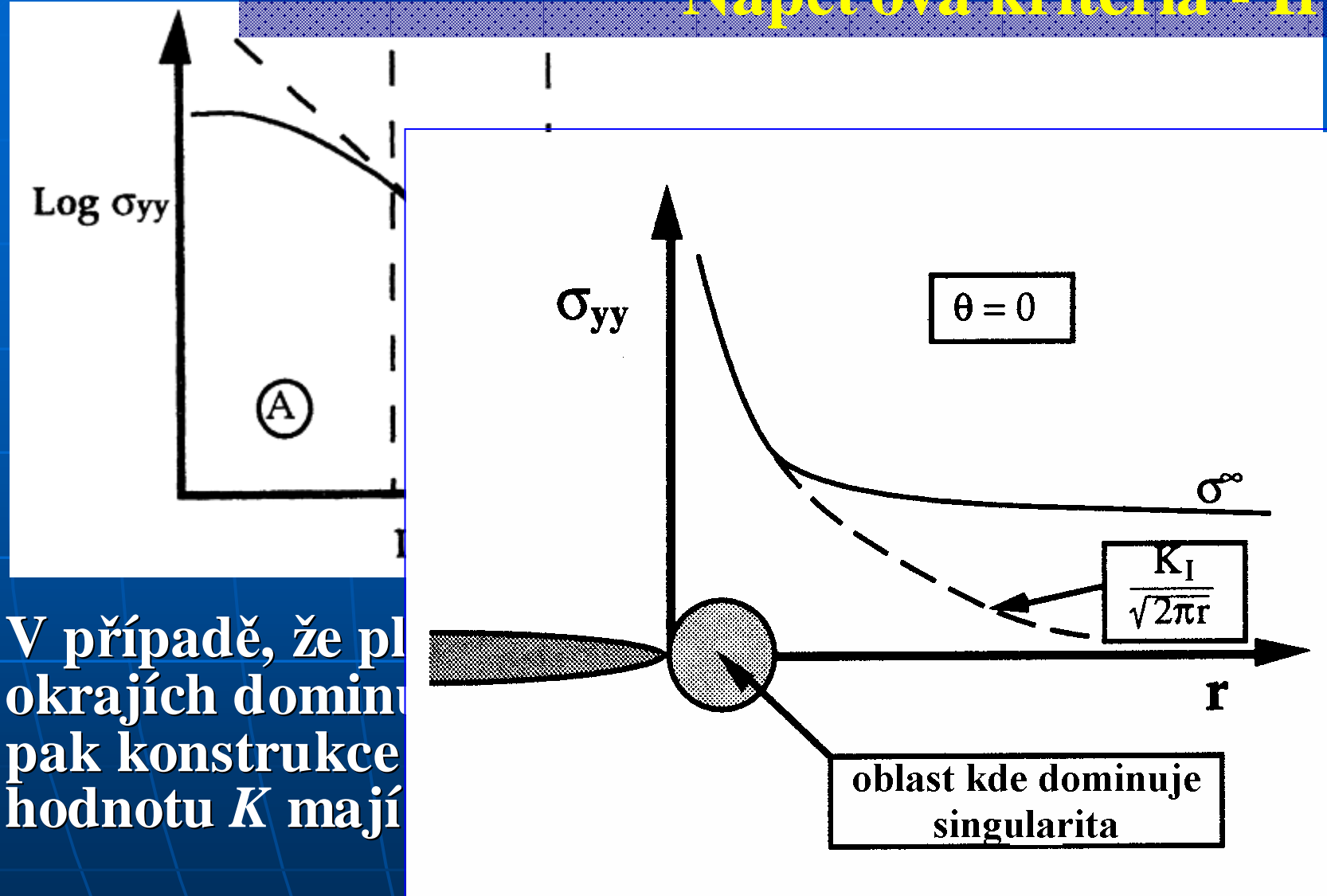
Podmínky platnosti



K_I

- určuje napjatost v okolí trhliny
- má jednoznačný vztah ke G_C

Napět'ová kritéria - Irwin

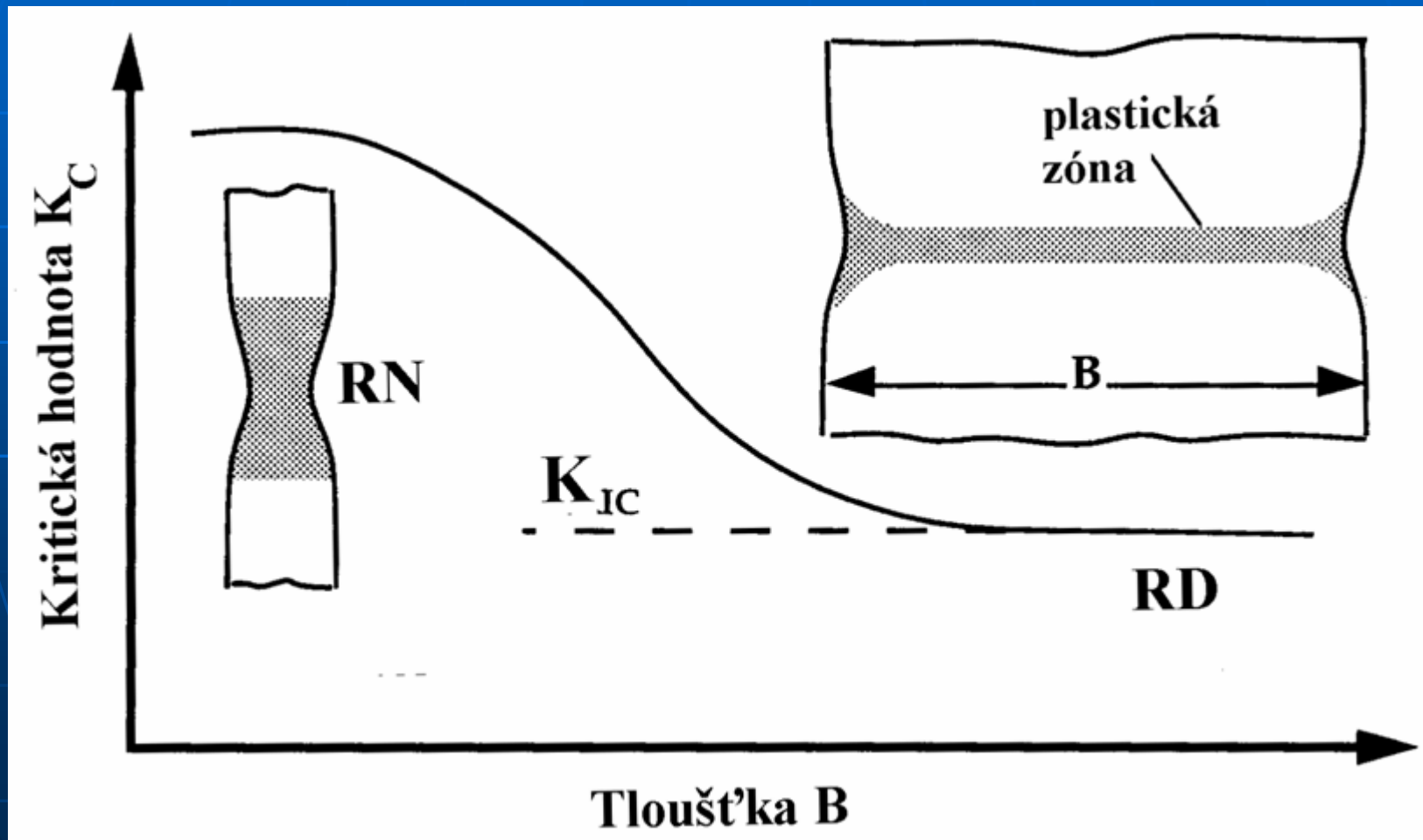


V případě, že pl
okrajích domini
pak konstrukce
hodnotu K mají

Lom nastane, když jak v tělese, tak i v konstrukci platí
 $K_I \equiv K_C$

Napět'ová kritéria - Irwin

Vliv rozměrů (tělesa, konstrukce)
na hodnotu K_c



Platnost lineární elastické LM

LELM – platí v případě, že k lomu dojde při existenci malé plastické zóny (2% velikosti tloušťky).

Podmínky jsou splněny pro

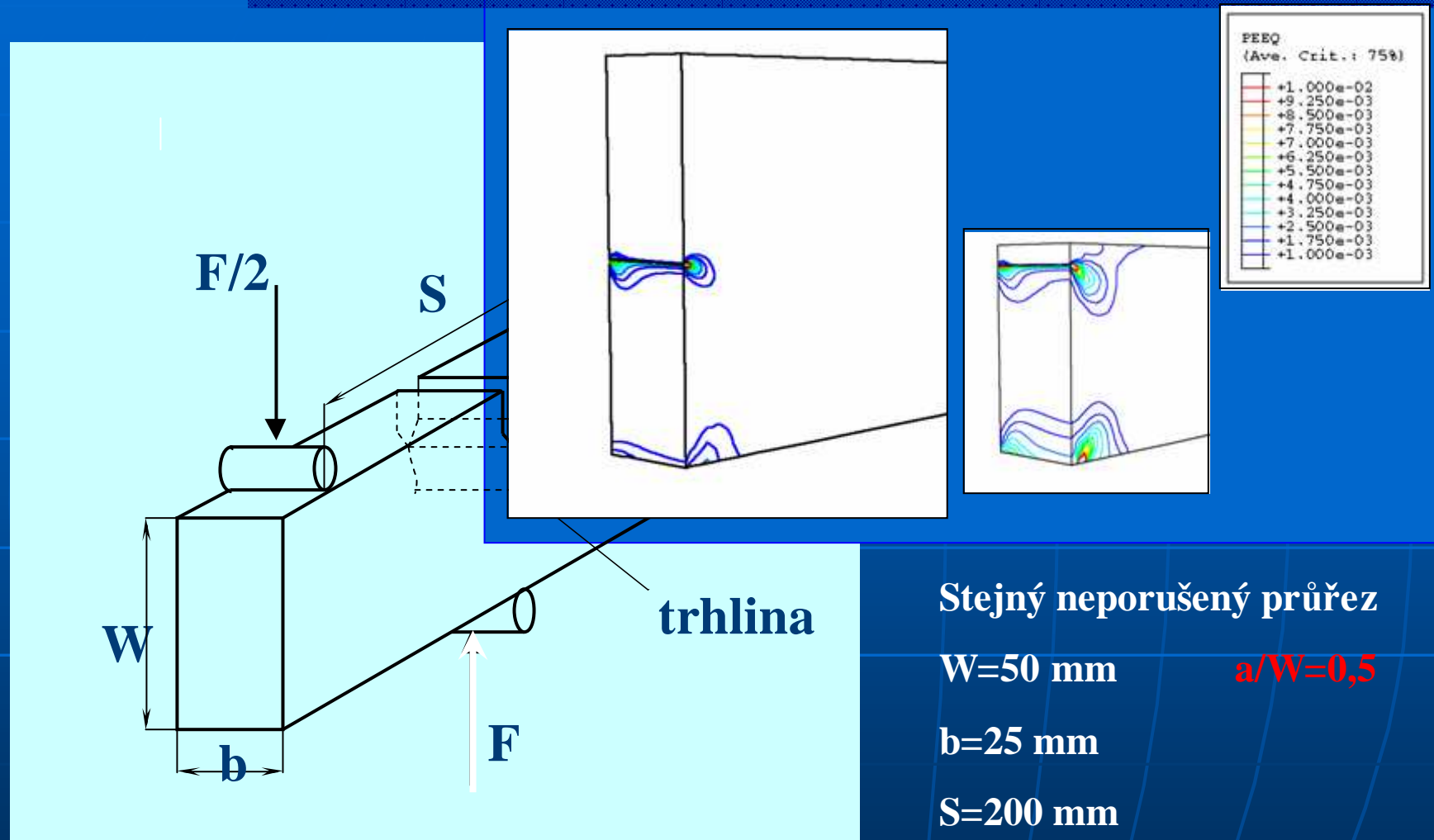
$$F_{fr} \leq (0,6 \div 0,8) F_{GY}$$

(Keramika, některé plasty, hliníkové slitiny, vysocepevné oceli, u běžných konstrukčních ocelí pouze pro velké tloušťky příp. dynamické podmínky zatěžování).

Zkoušení K_{Ic}



Zkoušení K_{Ic}



Stejný neporušený průřez

$W=50$ mm $a/W=0,5$

$b=25$ mm

$S=200$ mm

$W=26$ mm $a/W=0,1$

$b=25$ mm

$S=104$ mm

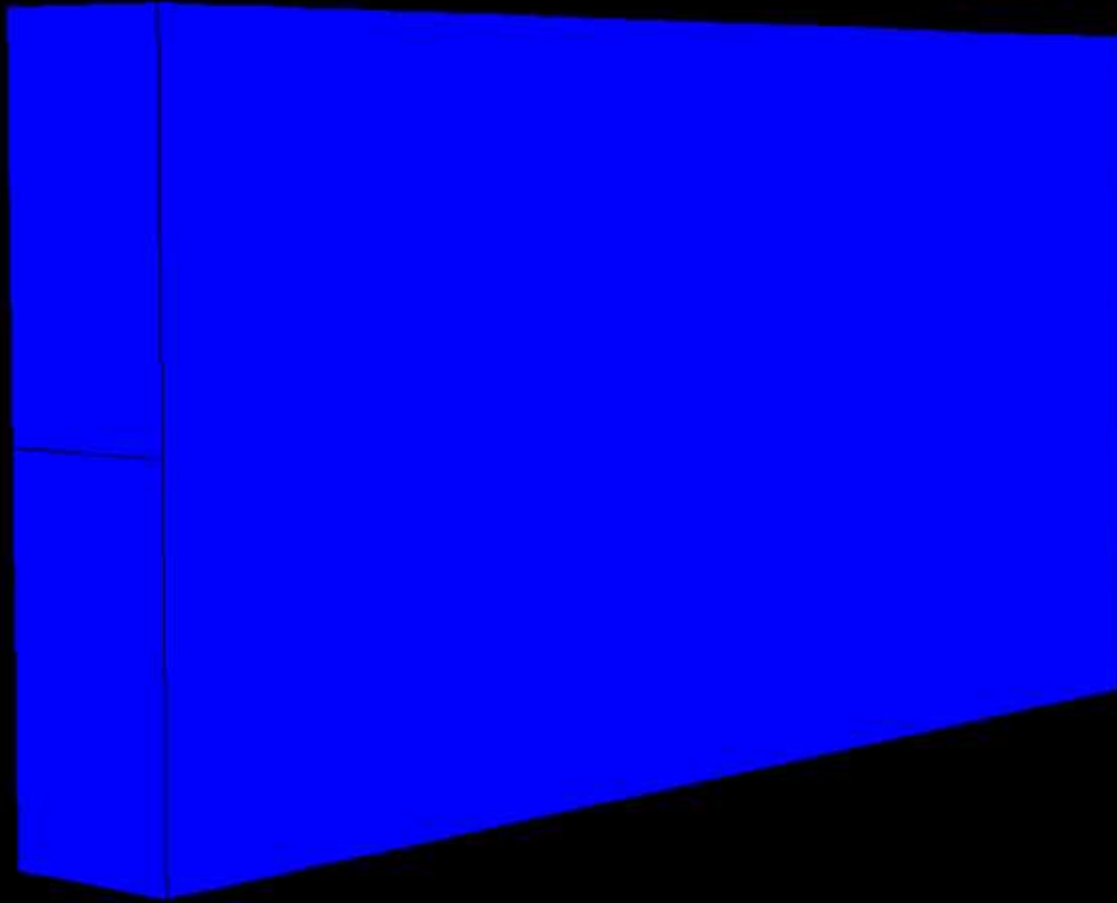
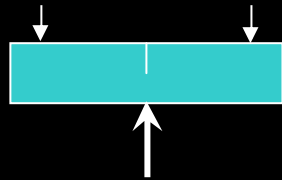
$a/W \approx 0,5$

největší hlavní napětí

Viewport: 1 ODB: /usr/people/chlup/scratch/w05.odb

Step: 0 Frame: 0

S, Max. Principal
(Ave. Crit.: 75%)



ODB: w05.odb ABAQUS/Standard 6.1-1 Sun Mar 18 00:06:18 CET 2001



Step: load-1 Increment 0: Step Time = 0.0000E+00
Primary Var: S, Max. Principal

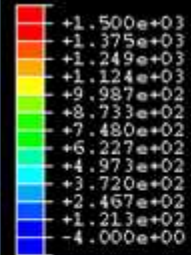
$a/W \approx 0,5$

největší hlavní napětí - detail

Viewport: 1 ODB: /usr/people/chlup/scratch/w05.odb

Step: 0 Frame: 0

S, Max. Principal
(Ave. Crit.: 75%)



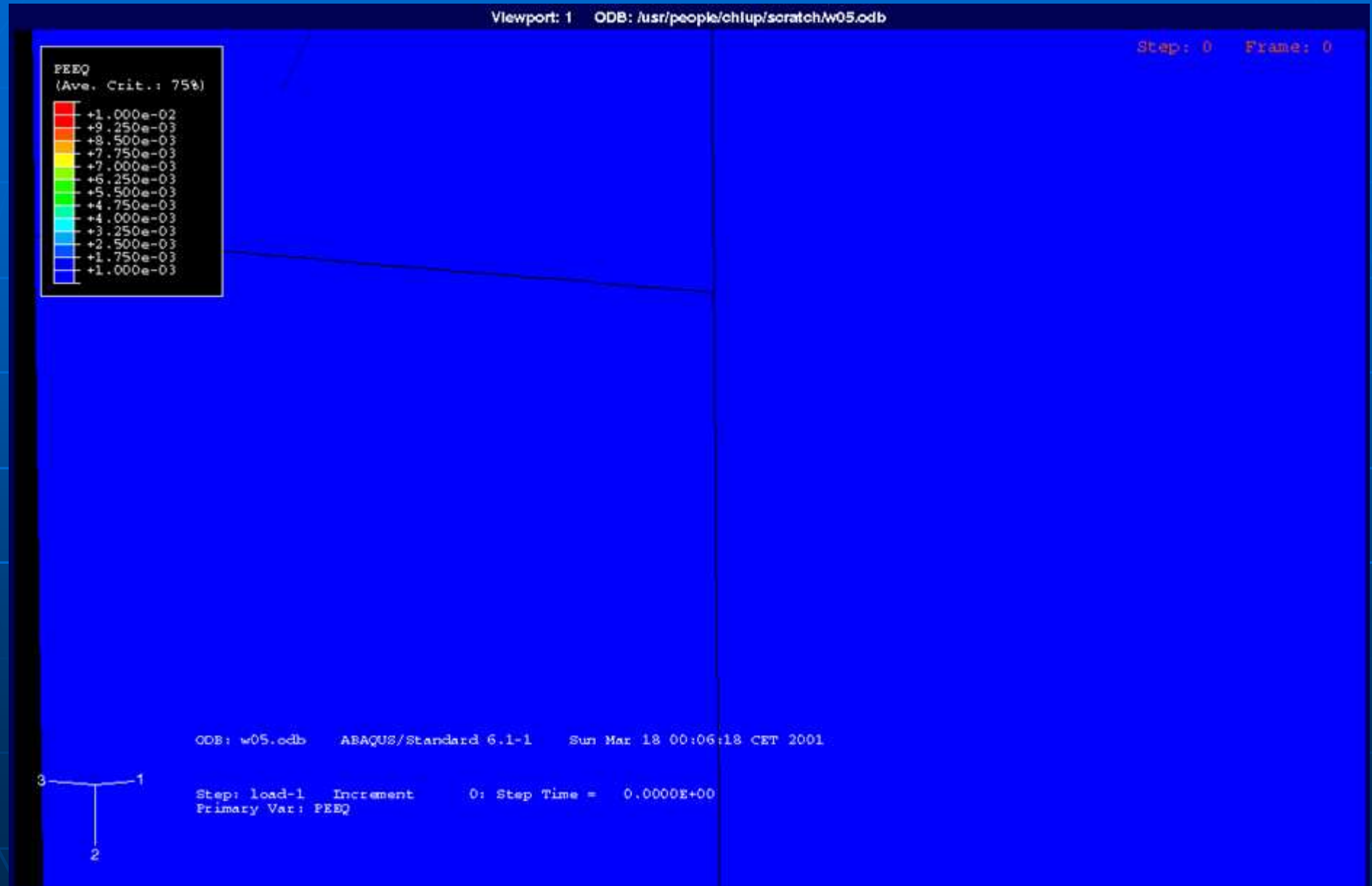
ODB: w05.odb ABAQUS/Standard 6.1-1 Sun Mar 18 00:06:18 CET 2001

Step: load-1 Increment 0: Step Time = 0.0000E+00
Primary Var: S, Max. Principal



$a/W \approx 0,5$

plastická deformace - detail

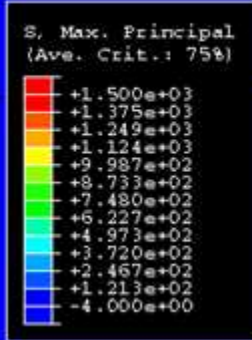


$a/W \approx 0,1$

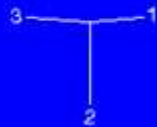
největší hlavní napětí - detail

Viewport: 1 ODB: /usr/people/chlup/scratch/w01.odb

Step: 0 Frame: 0



ODB: w01.odb ABAQUS/Standard 6.1-1 Wed Apr 11 19:06:11 CEST 2001



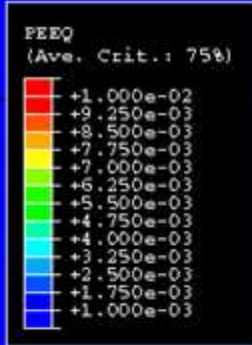
Step: load-1 Increment 0: Step Time = 0.0000E+00
Primary Var: S, Max. Principal

$a/W \approx 0,1$

plastická deformace - detail

Viewport: 1 ODB: /usr/people/chlup/scratch/w01.odb

Step: 0 Frame: 0



ODB: w01.odb ABAQUS/Standard 6.1-1 Wed Apr 11 19:06:11 CEST 2001



Step: load-1 Increment 0: Step Time = 0.0000E+00
Primary Var: PEEQ

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)**