

# 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)**

# 1)Elasticko Plastická Lomová Mechanika

- Rozevření trhliny  $\delta$
- $J_I$  – integrál

# 2) Měření materiálových charakteristik zavedených lomovou mechanikou

# 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

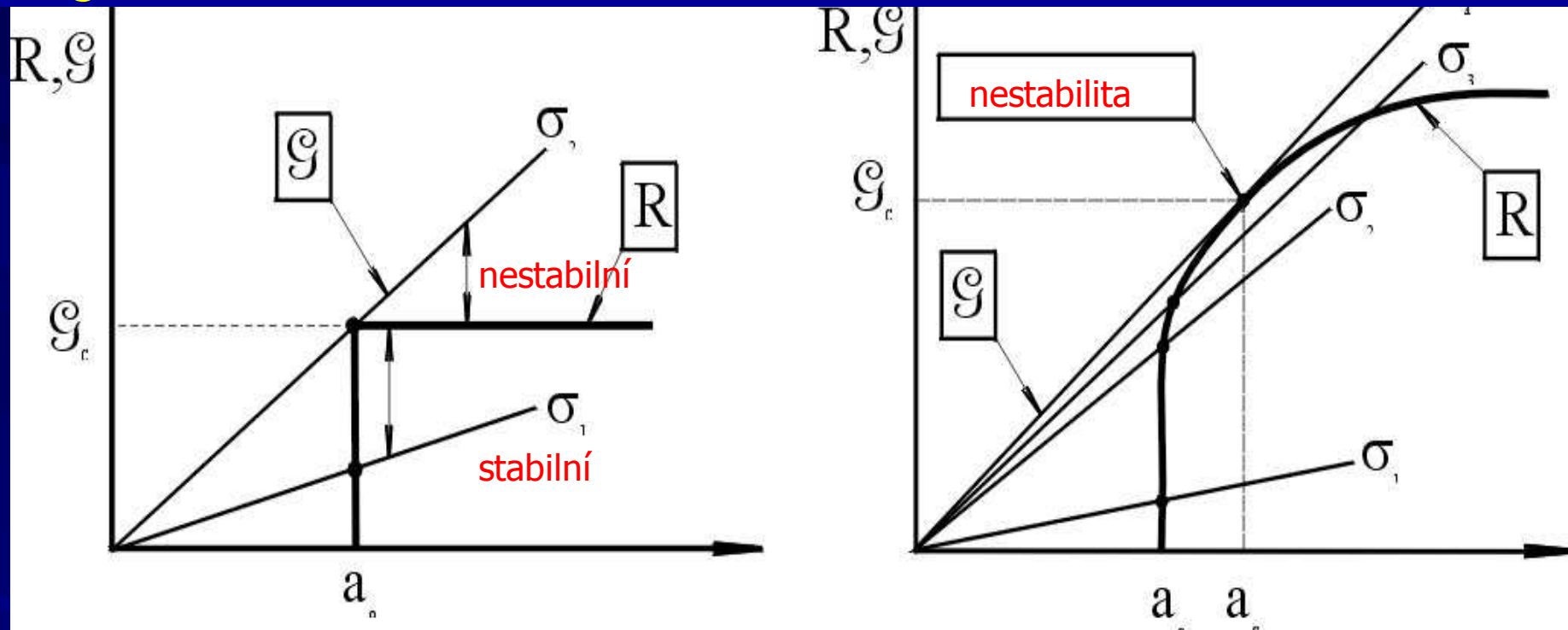
$$R = \frac{dW_s}{dA} \quad R = 2(\gamma_s + \gamma_p) = G_C$$

**HOUŽEVNATOST  $G_C$**

# Energetická kritéria - Irwin

tvár křivky – inherentní vlastnost materiálu

$G_C$  – materiálová vlastnost (lomová houževnatost)

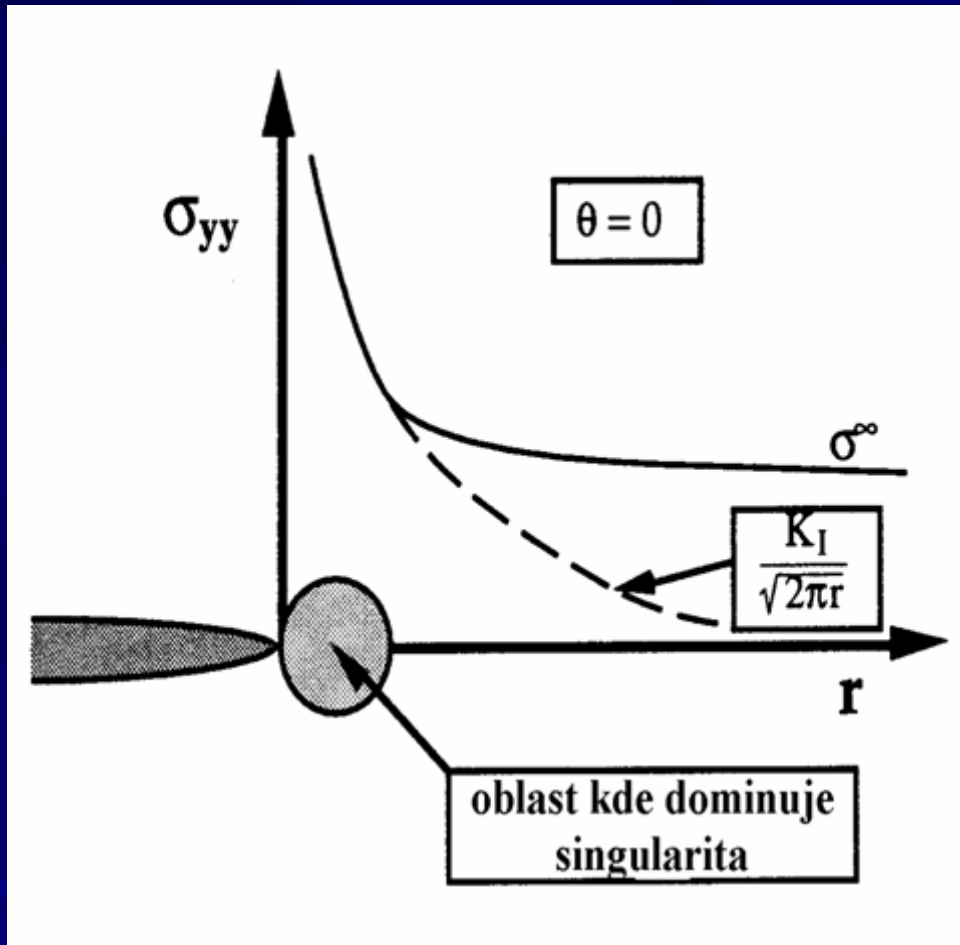


stabilní šíření trhliny – trhlina se nešíří, pokud neroste zátěžná síla

nestabilní šíření

– trhlina se šíří samovolně, bez nutnosti dalšího zatěžování

# Napět'ová kritéria - Irwin



$r$  a  $\theta$  - polární souřadnice

$\sigma_{ij}$  - složky tenzoru napětí

$k$  - konstanta

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

- bezrozměrné veličiny  
(funkcí úhlu  $\theta$ )

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

## Platnost lineární elastické LM

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

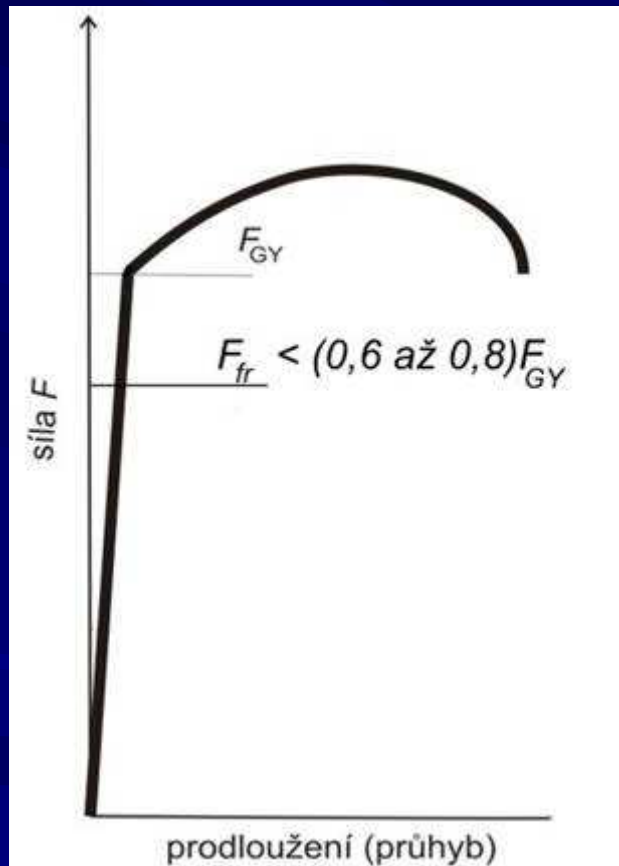
Podmínky jsou splněny pro

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

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

# Platnost lineární elastické LM

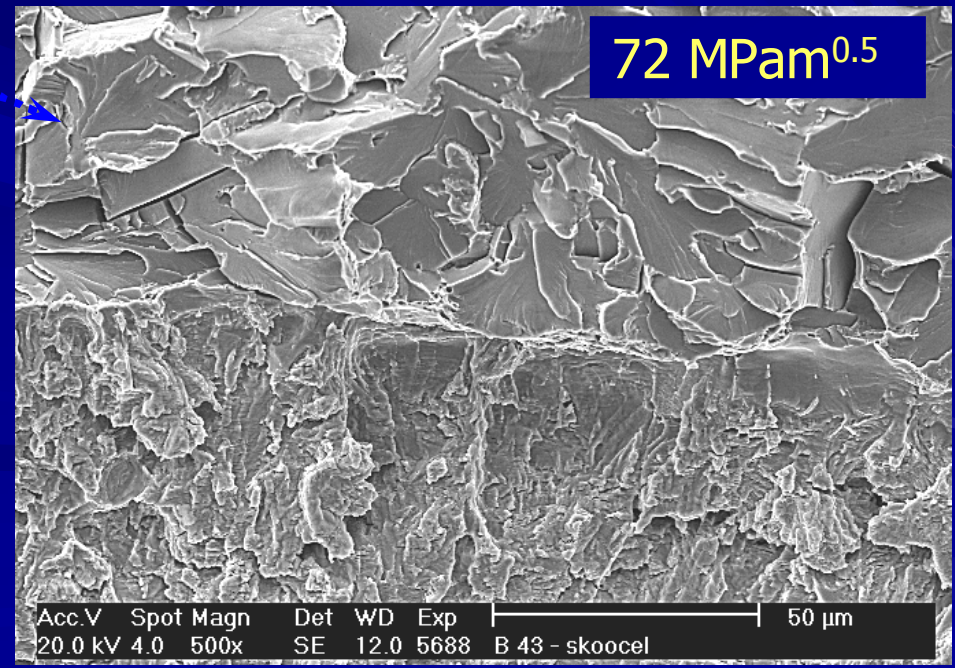
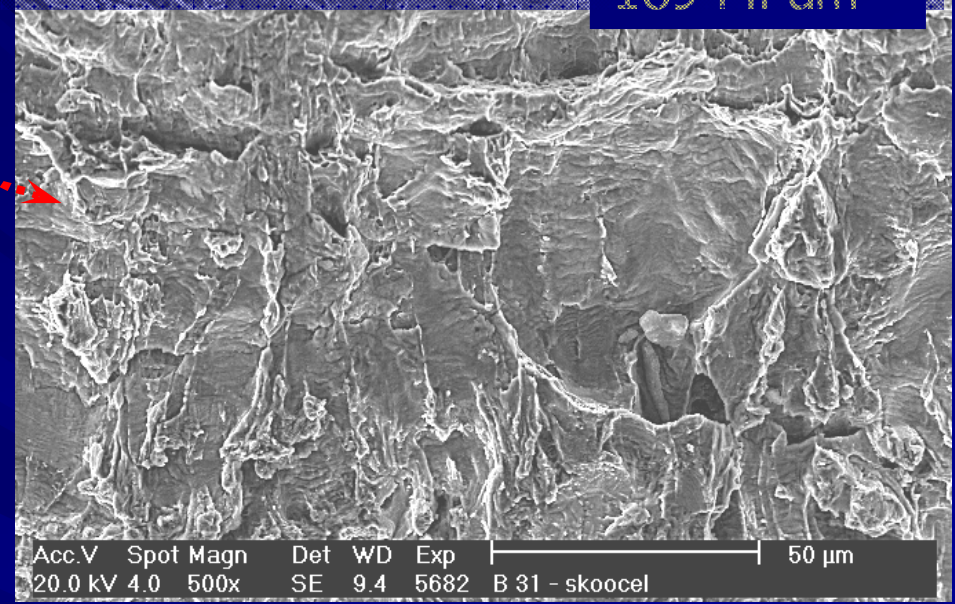
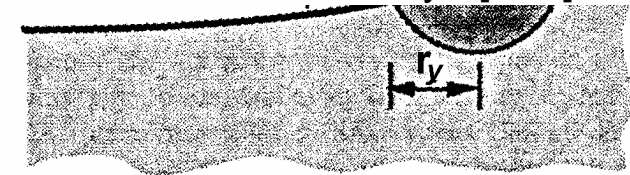
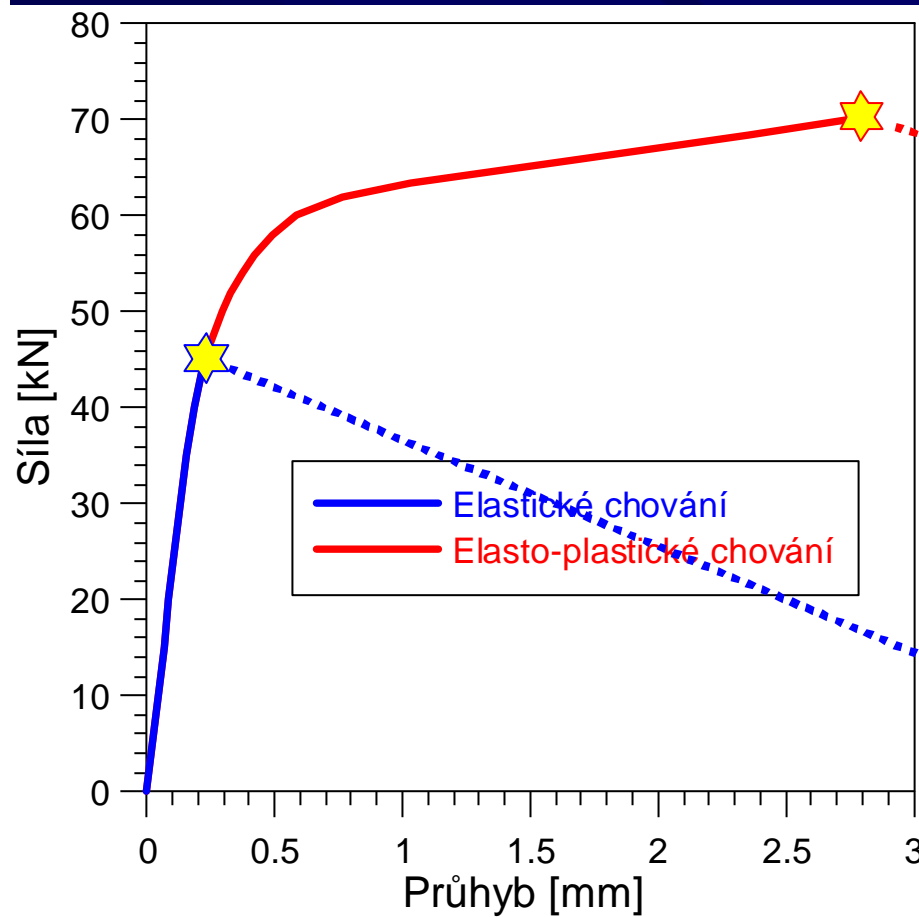
Pro běžné svařitelné oceli lineární elastická lomová mechanika neplatí



$$\frac{B}{r_y} = \frac{2,5 \left( \frac{K_{Ic}}{R_e} \right)^2}{\frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_{Ic}}{R_e} \right)^2} \cong 50$$

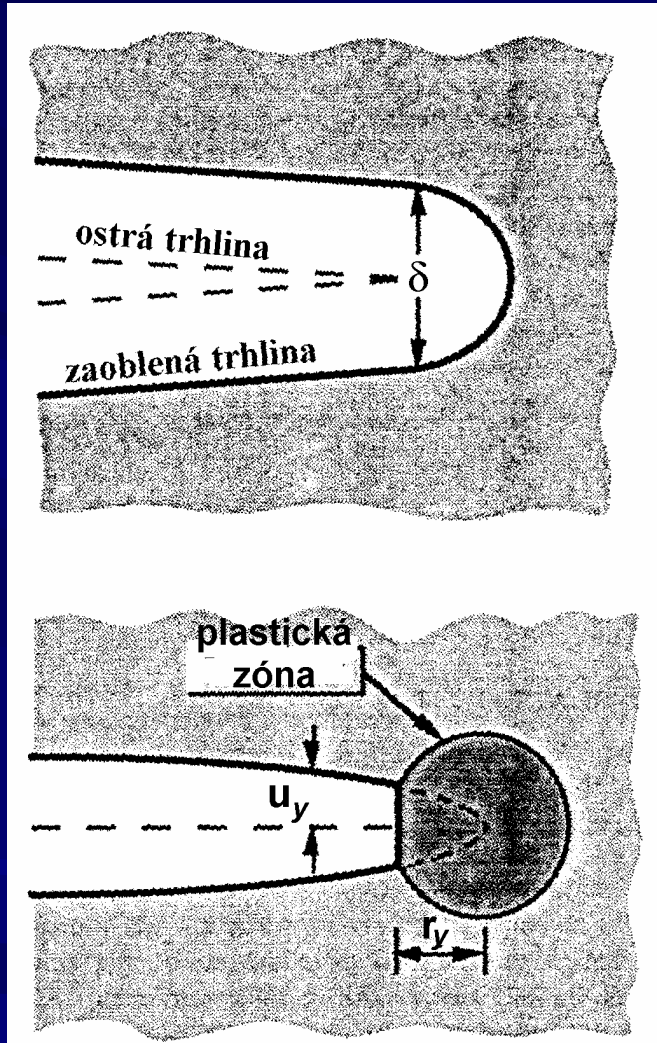
Plastická zóna má velikost 2% tloušťky

# Elasto - plastická lomová mechanika





# Elasto - plastická lomová mechanika



**Rozevření trhliny  $\delta$**   
(CTOD – crack tip opening displacement - Welles)

**Lom vznikne, když  $\delta = \delta_c$**   
(materiálová charakteristika)

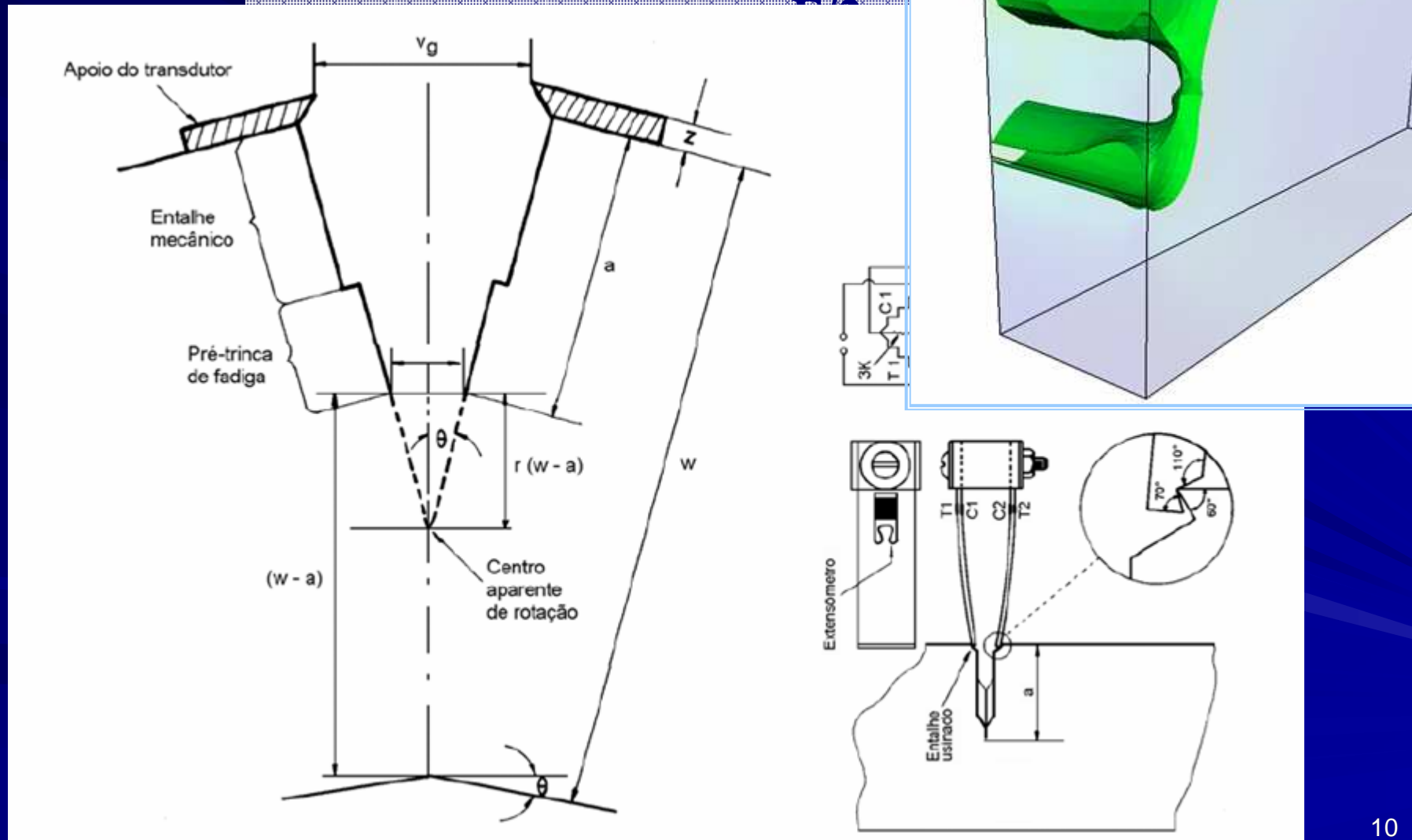
Zkušební těleso

má stejnou tloušťku jako konstrukce

$\delta$  je stejné pro těleso i konstrukci

# Elasto - plástická lomová mechanika

## Kritické rozevření trhliny - $\delta$ , CTOD



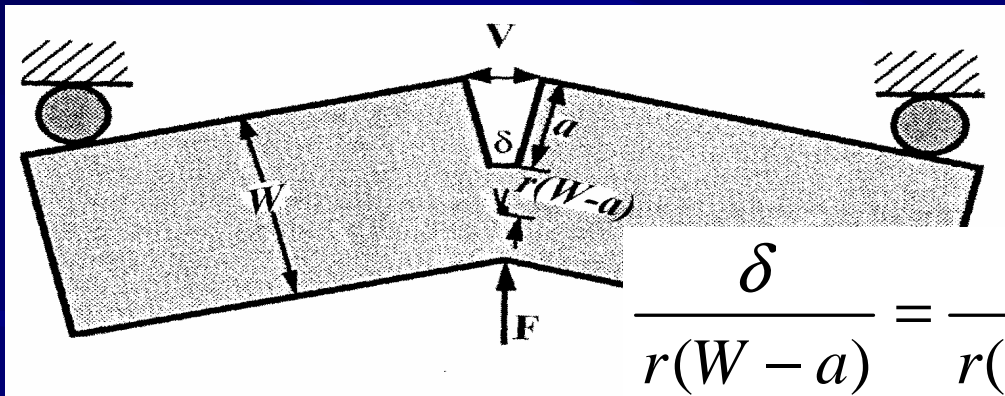
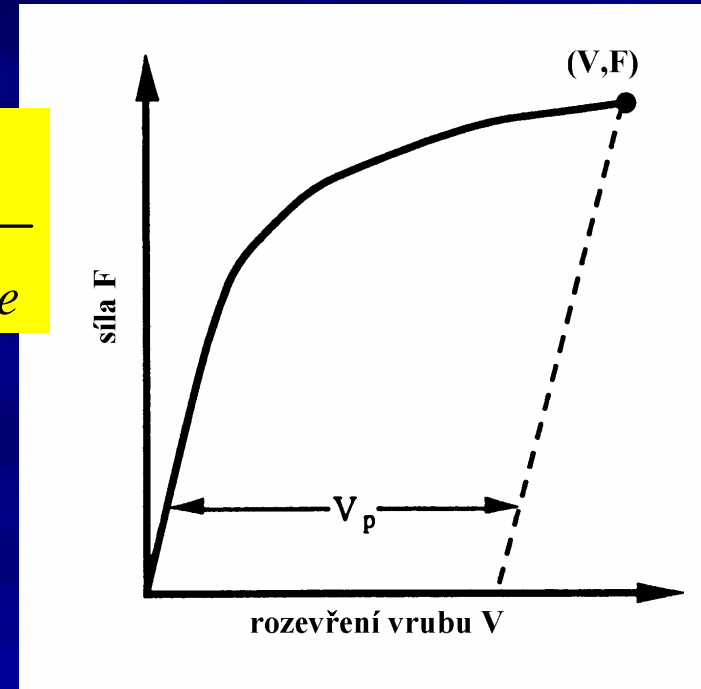
# Elasto - plastická lomová mechanika

## Kritické rozevření trhliny - $\delta_c$ , CTOD

$$u_y = \frac{\kappa + 1}{2\Gamma} K_I \sqrt{\frac{r_y}{2\pi}}$$

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{R_e} \right)^2$$

$$\delta = \frac{K_I^2}{mR_e E} = \frac{G}{mR_e}$$



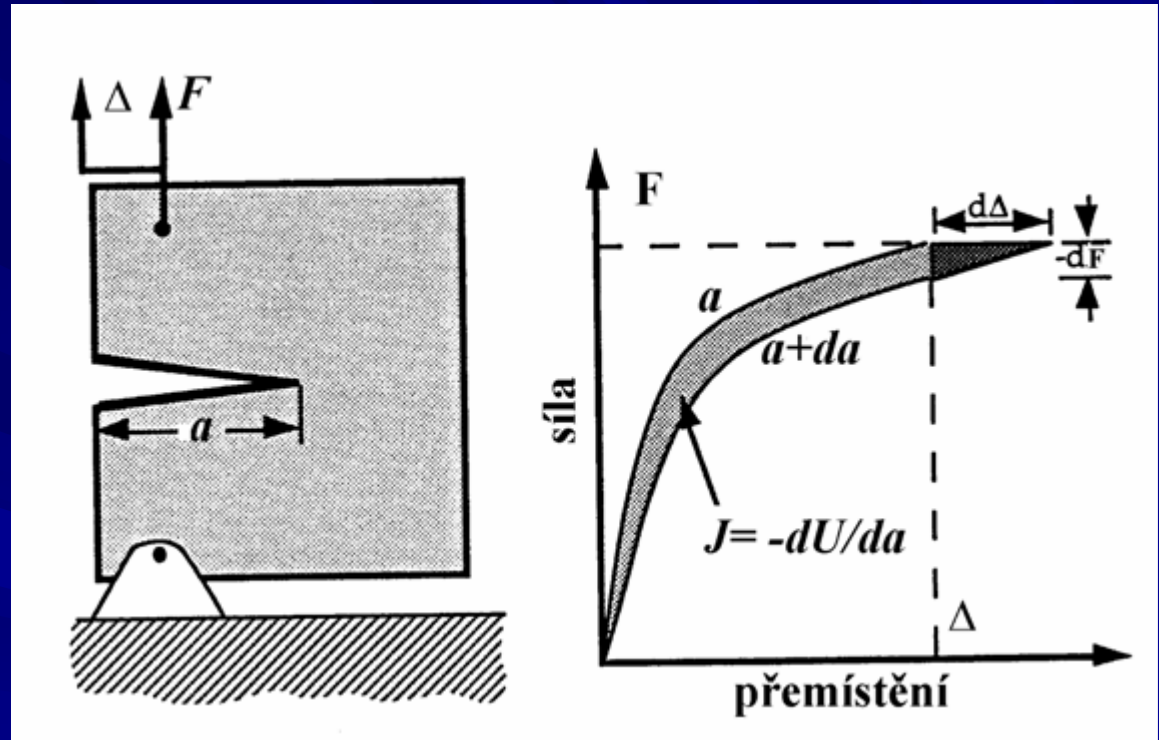
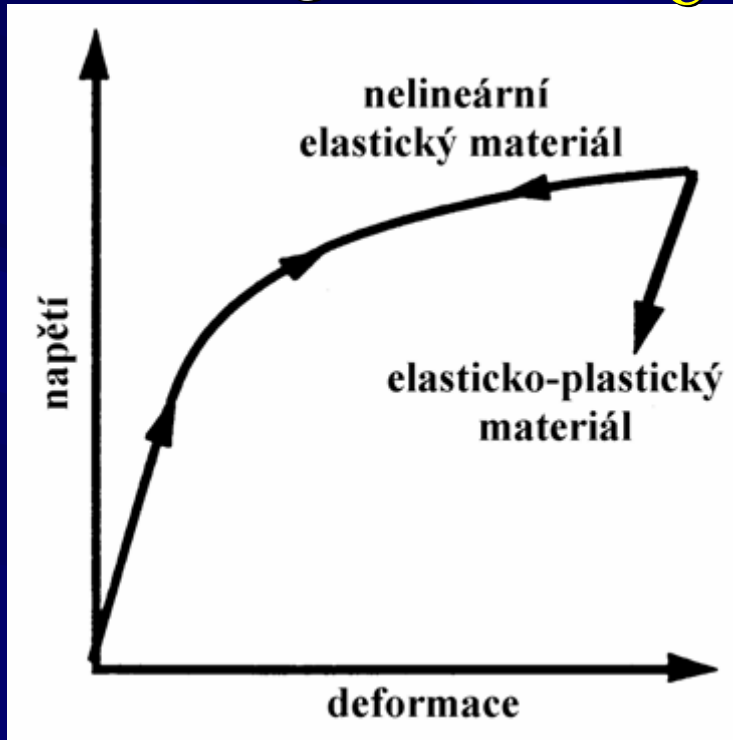
$$\frac{\delta}{r(W-a)} = \frac{V}{r(W-a) + a}$$

$$\delta = \frac{r(W-a)V}{r(W-a) + a}$$

$$\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} = \frac{K_I^2}{mR_e E'} + \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a) + a}$$

# Elasto - plastická lomová mechanika

J – integrál  $J_C$



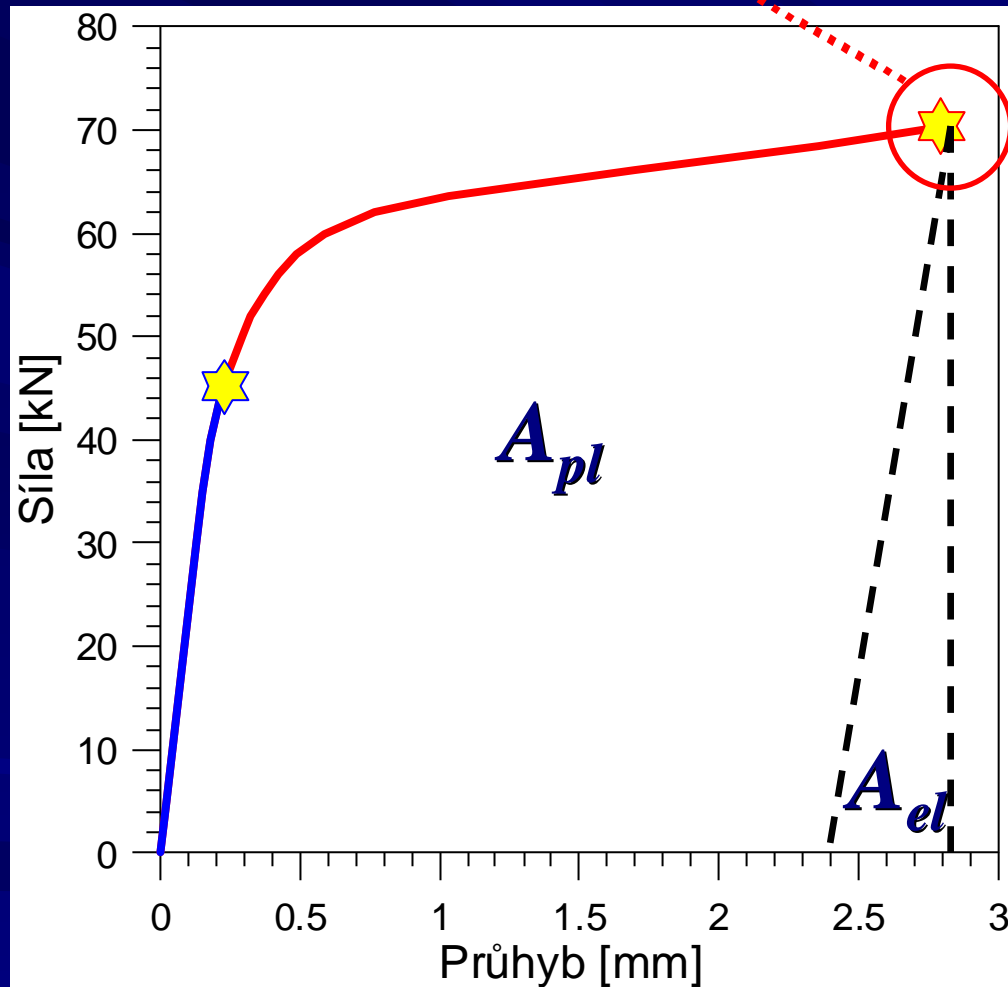
$$J_I = -\frac{dU}{da}$$

$$G = -\frac{dW_{el}}{da}$$

Rychlost uvolňování elastické energie

# Elasto - plastická lomová mechanika

J – integrál



$$J_q = J_{el} + J_{pl}$$

$$[ \text{kPa} \cdot \text{m} ]$$

$$[ \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} ]$$

$$K_I = \sqrt{J_I E'}$$

RD

$$E' = \frac{E}{1 - \mu^2}$$

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{E \cdot J_{IC}}{1 - \mu^2}}$$

# Elasto - plastická lomová mechanika

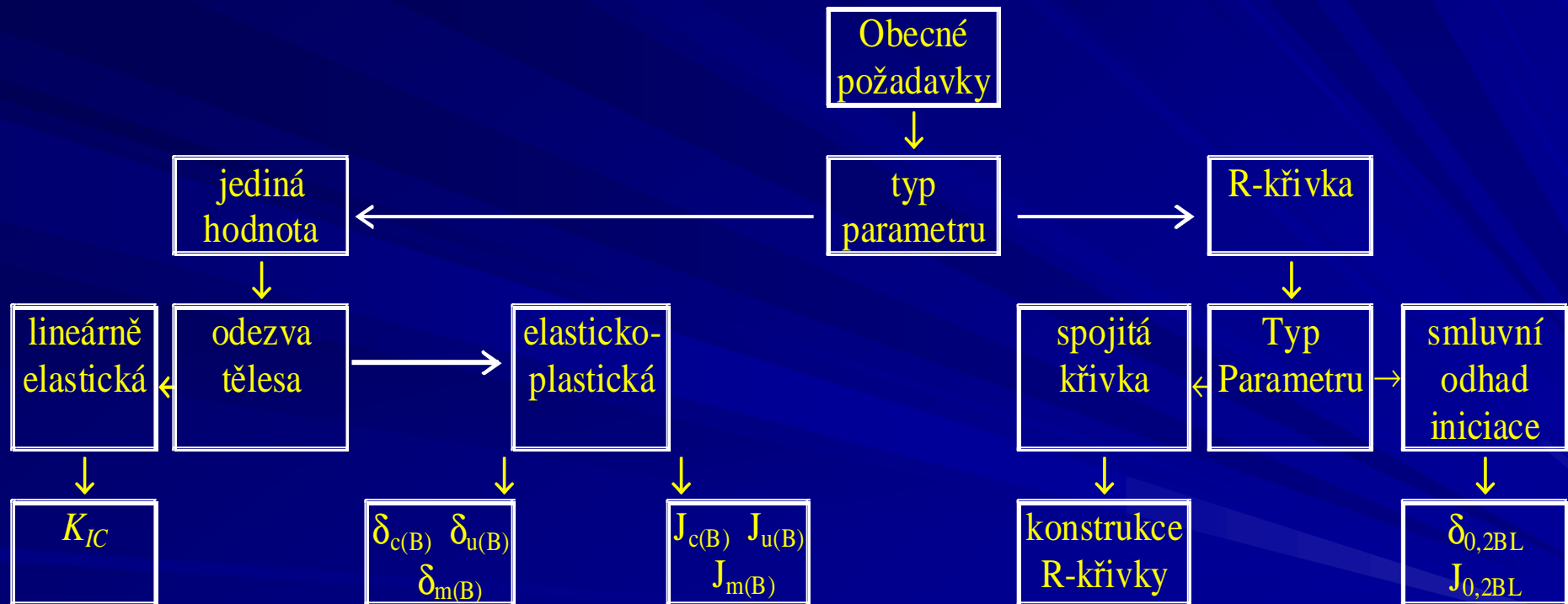
Měření materiálových charakteristik zavedených lomovou mechanikou

$K_{Ic}$	ASTM	E399 - 1970
$\delta_c$	BS	5765 – 1979
$J_c$	ASTM	E813 – 1981

**ISO 12135 - Kovové materiály - Jednotná zkušební metoda pro určení lomové houževnatosti**

# Elasto - plastická lomová mechanika

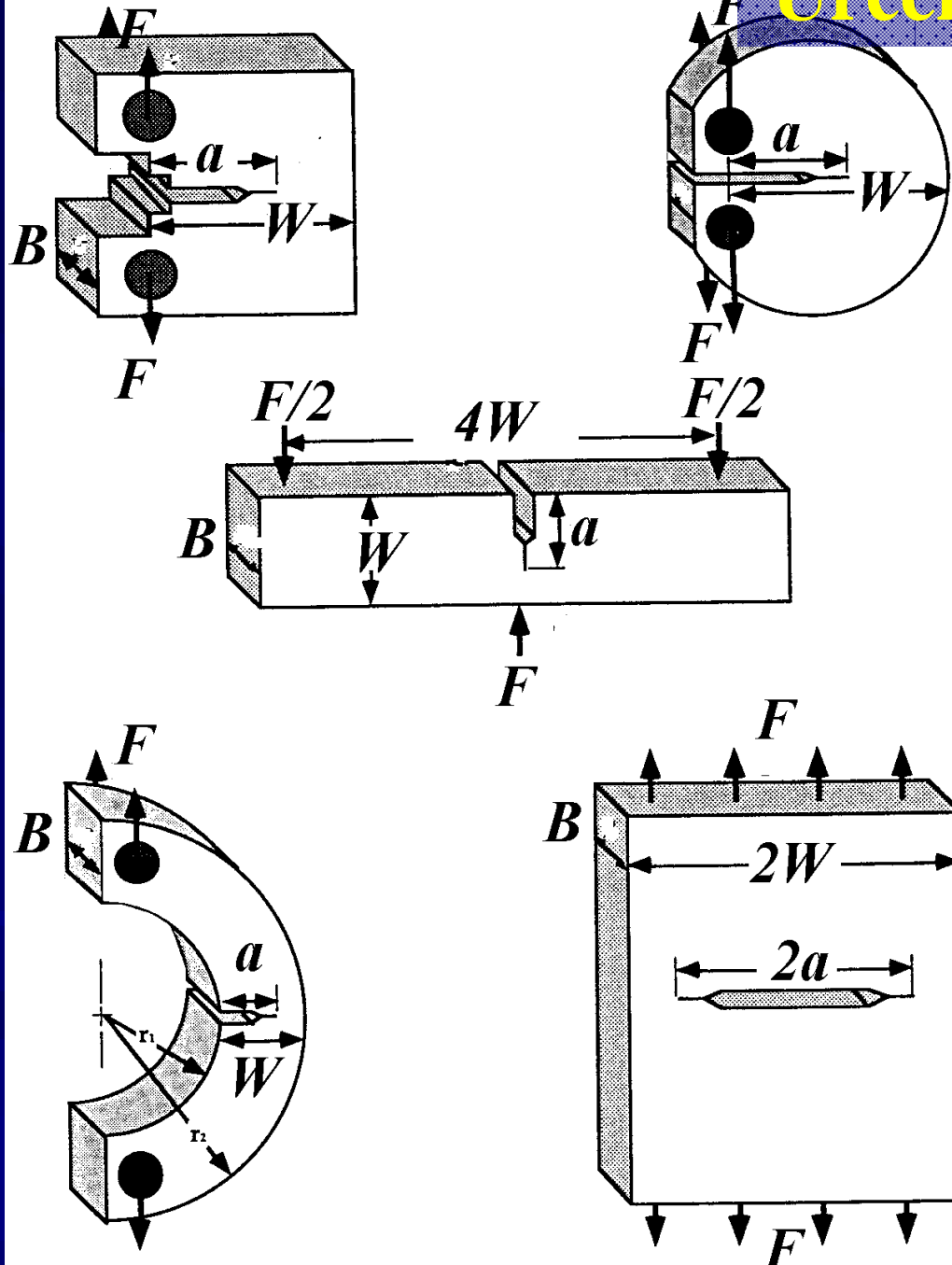
Jak se určuje lomová houževnatost ?



# Určení lomové houževnatosti

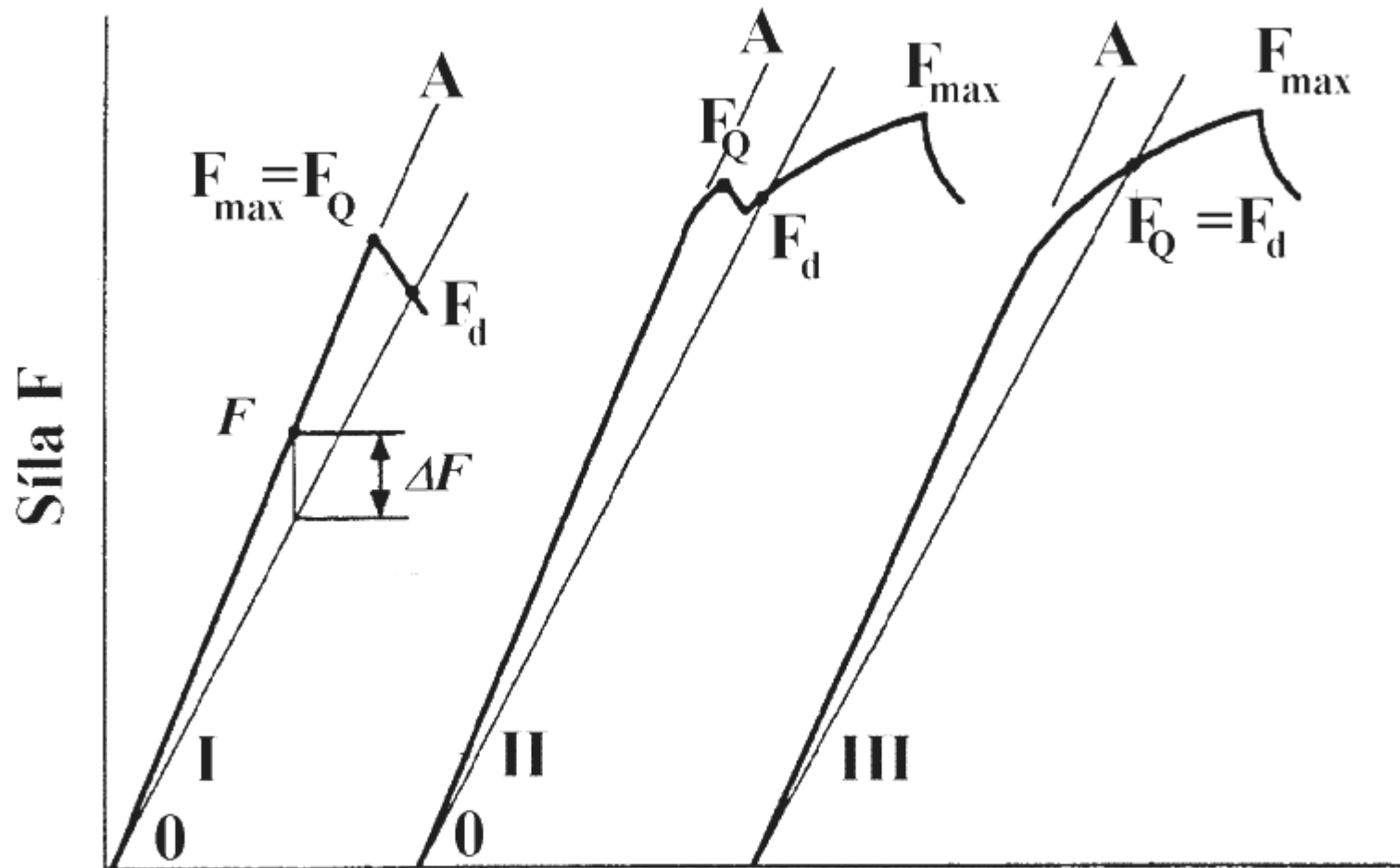
LELM

Tvary zkušebních těles  
pro měření  
lomové houževnatosti





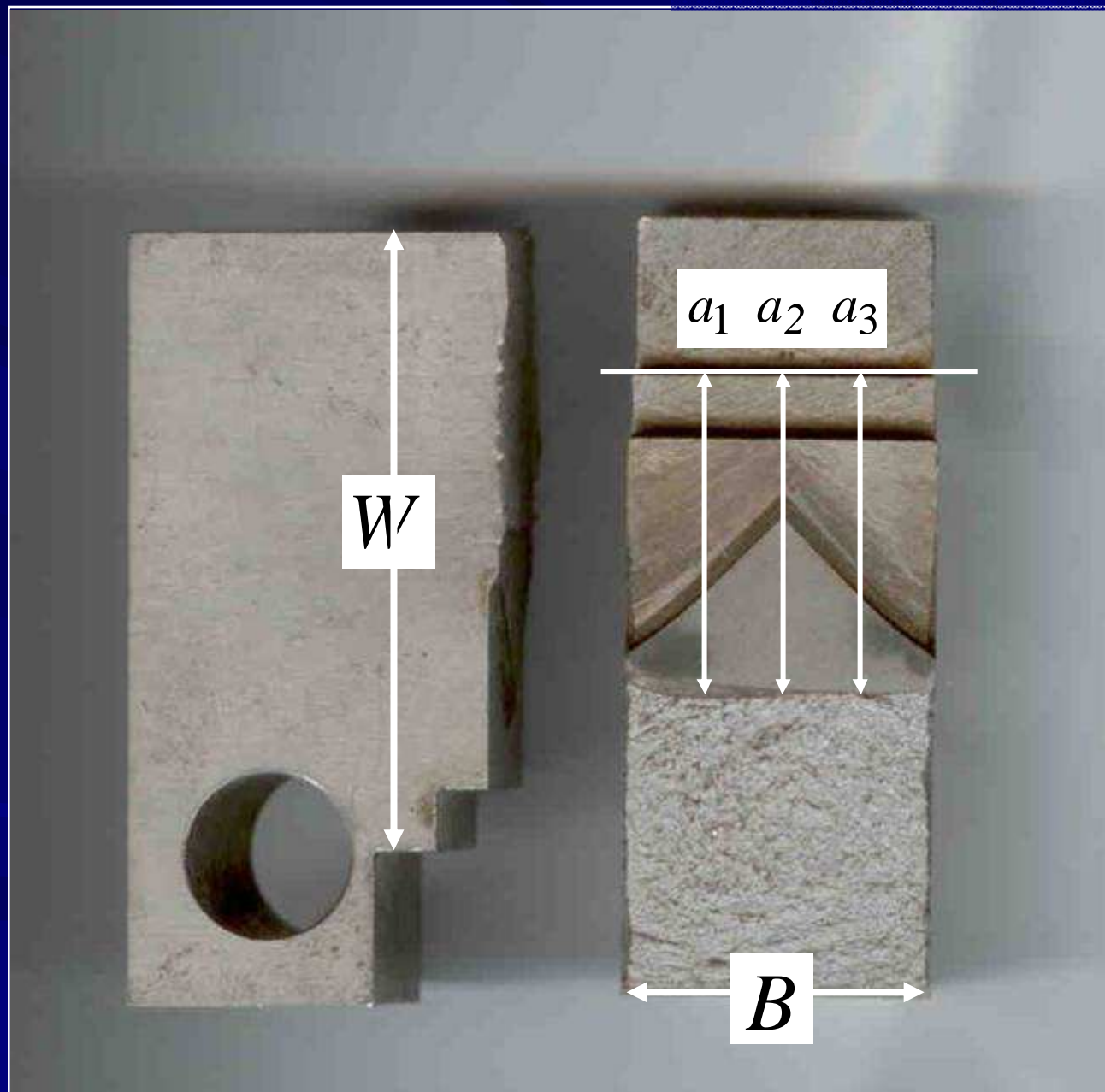
# Určení lomové houževnatosti



Rozevření vrubu (V) nebo přemístění síly (q)

Poznámka -  $\Delta F/F$  je větší než ve skutečnosti pro lepší názornost

# Určení lomové houževnatosti



# Určení lomové houževnatosti

## LELM

$K_Q$  provizorní hodnota  
lomové houževnatosti

$$K_Q = \frac{F_Q}{B\sqrt{W}} g\left(\frac{a}{W}\right);$$

$$K_f \leq 0,6K_Q \frac{R_e(T_1)}{R_e(T_2)}$$

$$F_{\max} \leq 1,1F_Q$$

$$a, B, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{R_e}\right)^2$$

podmínky platnosti

## LELM

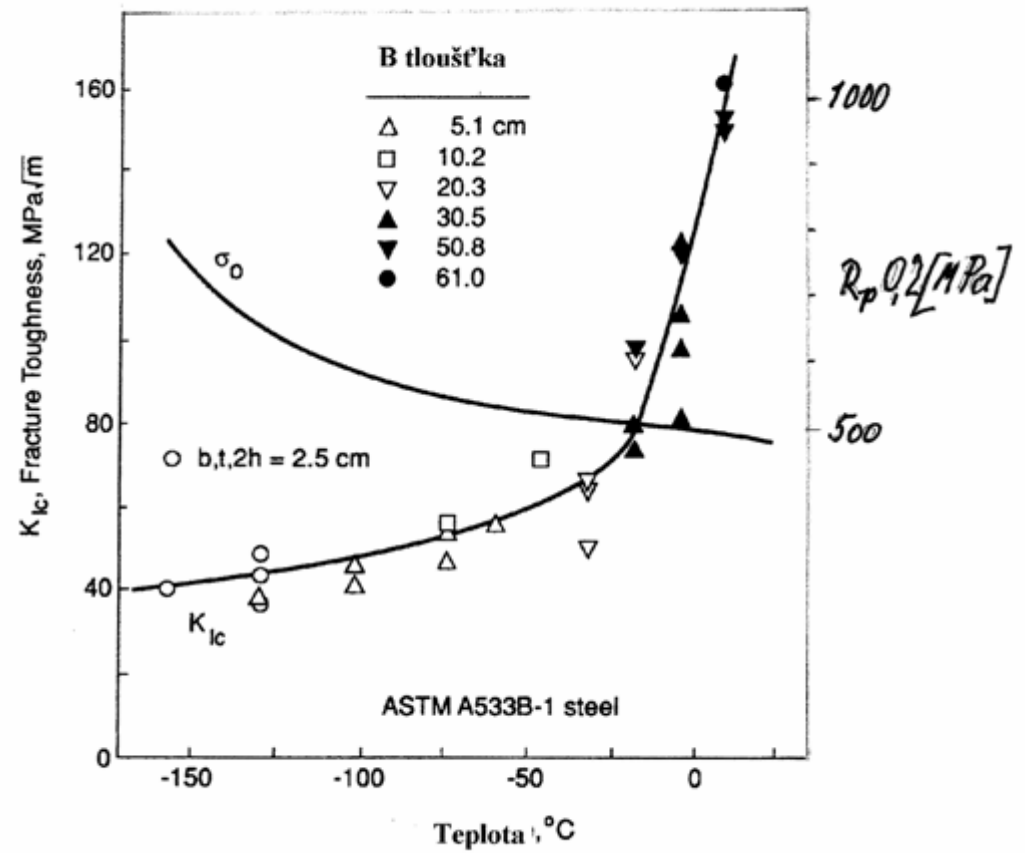
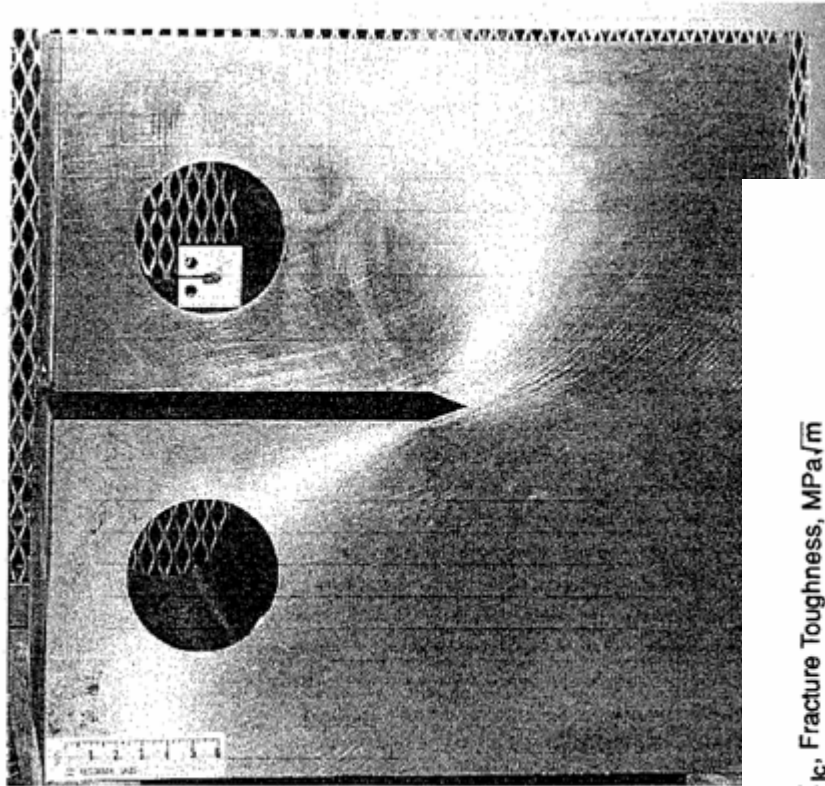
$$K_Q \equiv K_{IC}$$

kvalifikační procedury

$$K_Q \equiv K_{IC}, K_C, K_{JC}, K_{JC(Q)}, K_{Ji}, K_{Jm}$$

# Určení lomové houževnatosti

## LELM



# Určení lomové houževnatosti

## LELM

Tyto podmínky jsou splněny

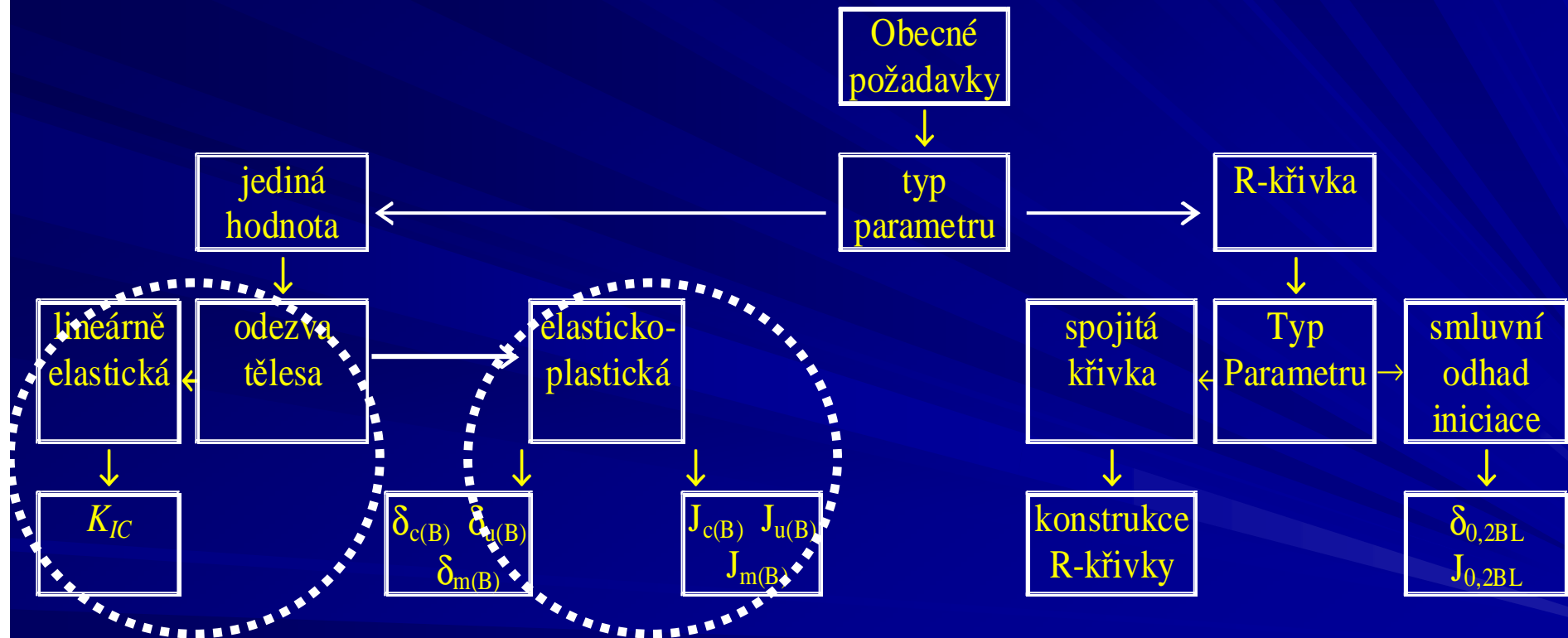
**Ti slitiny**  $K_{Ic} = (20 - 80) \text{ MPam}^{1/2}$   
 $R_e = (900 - 1300) \text{ MPa}$

**Al slitiny**  $K_{Ic} = (10 - 60) \text{ MPam}^{1/2}$   
 $R_e = (250 - 550) \text{ MPa}$

**kolejnice**  $K_{Ic} = (40 - 60) \text{ MPam}^{1/2}$  při + 20°C

# Elasto - plastická lomová mechanika

Jak se určuje lomová houževnatost ?

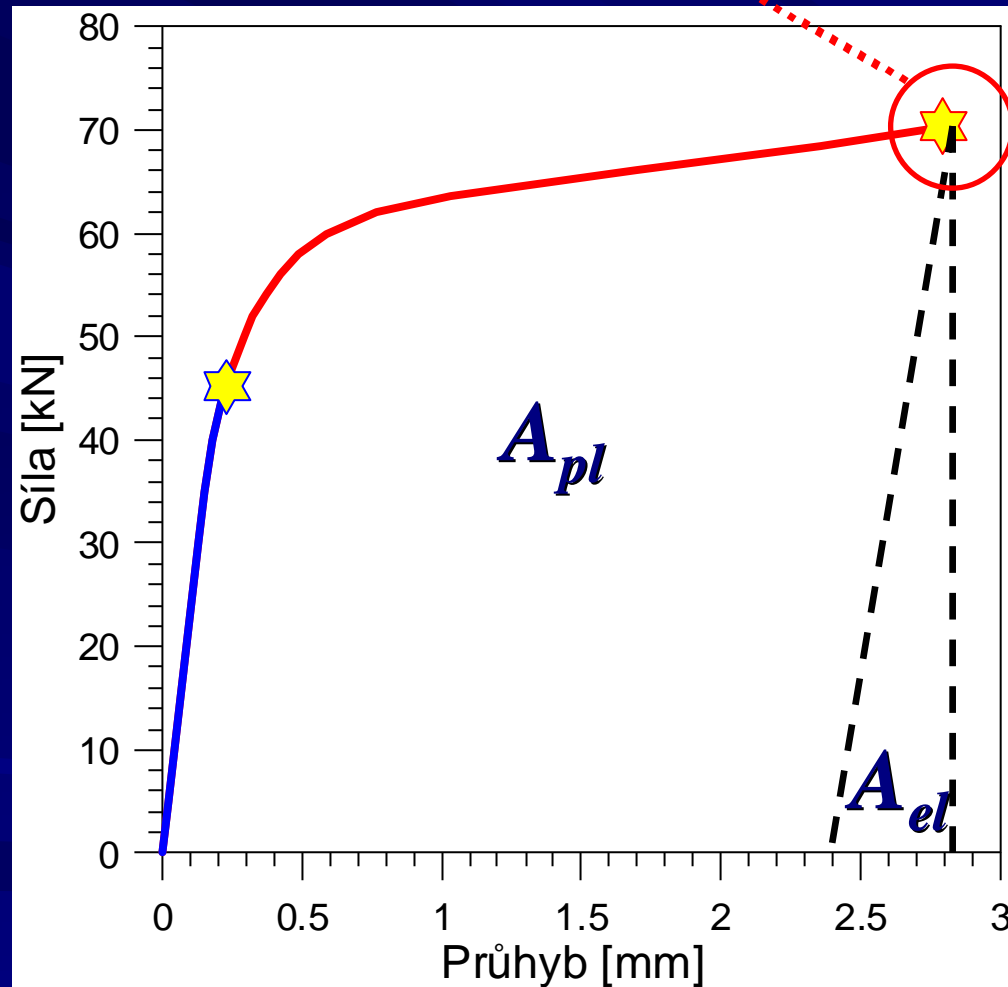


# Určení lomové houževnatosti

EPLM

J – integrál

$J_C$



$$J_Q = J_{el} + J_{pl}$$

$$J_e = \frac{1 - \mu^2}{E} K^2$$

$$J_p = \frac{A_{pl} f\left(\frac{a}{W}\right)}{B(W - a)}$$

# Určení lomové houževnatosti

$$J_q = J_{el} + J_{pl}$$

EPLM

$$J_e = \frac{1-\mu^2}{E} K^2 \quad J_p = \frac{A_{pl} f\left(\frac{a}{W}\right)}{B(W-a)}$$

Podmínka platnosti

$$a; B(W-a) \geq 50 \frac{J_{IC}}{R_e + R_m}$$

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{E \cdot J_{IC}}{1-\mu^2}}$$

$$K_{JC(\text{limit})} = \sqrt{\frac{E^* b^* R_p 0,2}{50}}$$

$$J = \left[ \frac{4F}{B\sqrt{W}} g_1\left(\frac{a}{W}\right) \right]^2 \left[ \frac{(1-\mu^2)}{E} \right] + \frac{2A_{pl}}{B(W-a)}$$

SENB

$$J = \frac{1-\mu^2}{E} K_{IC}^2 + \frac{\left[ 2 + 0,522 \left( 1 - \frac{a}{W} \right) \right] A_{pl}}{B(W-a)}$$

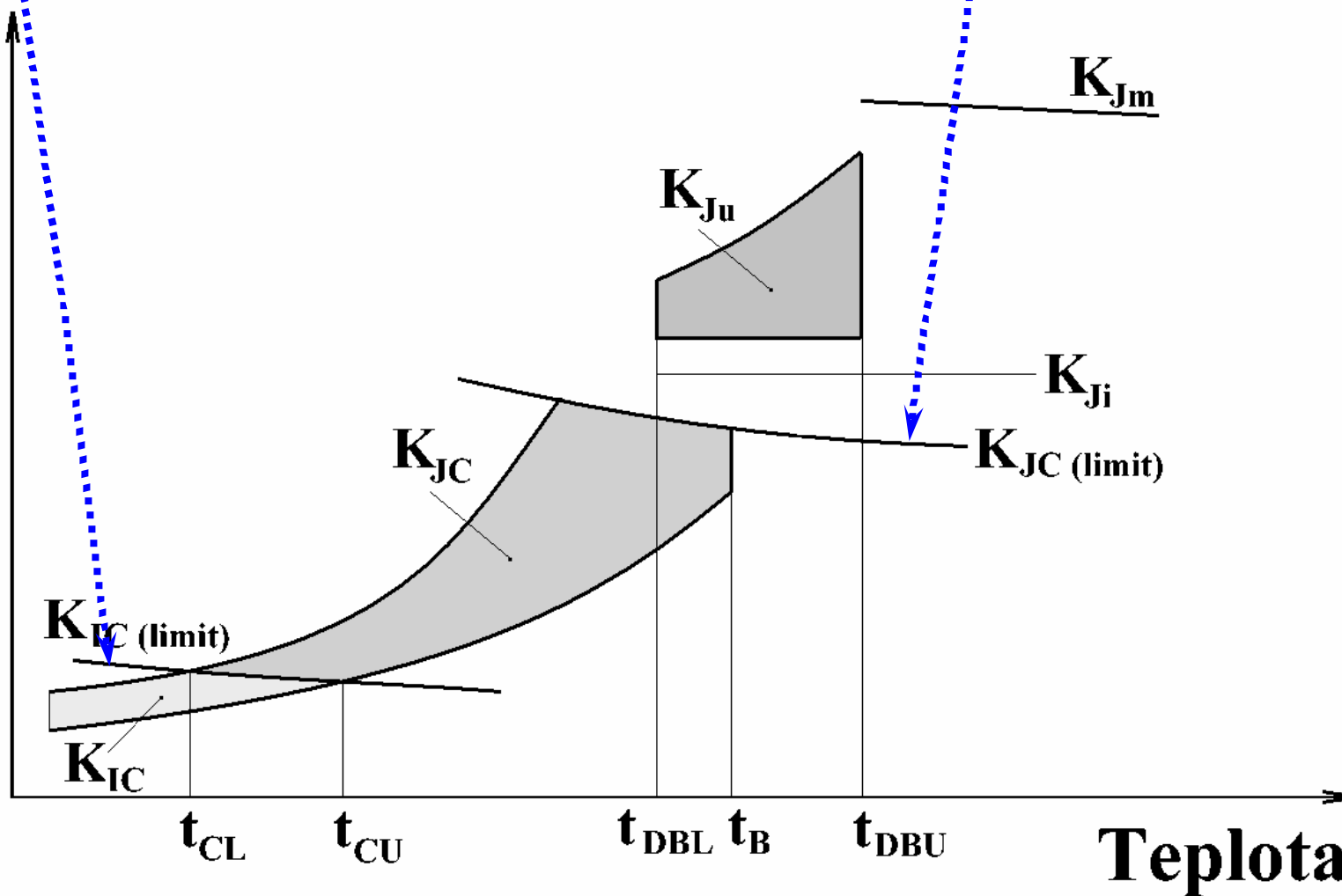
CT



$$K_{IC(\text{limit})} = R_p 0,2 * \sqrt{\frac{\min[a, B, (W - a)]}{2,5}}$$

$$K_{JC(\text{limit})} = \sqrt{\frac{E * b * R_p 0,2}{50}}$$

Lomová houževnatost

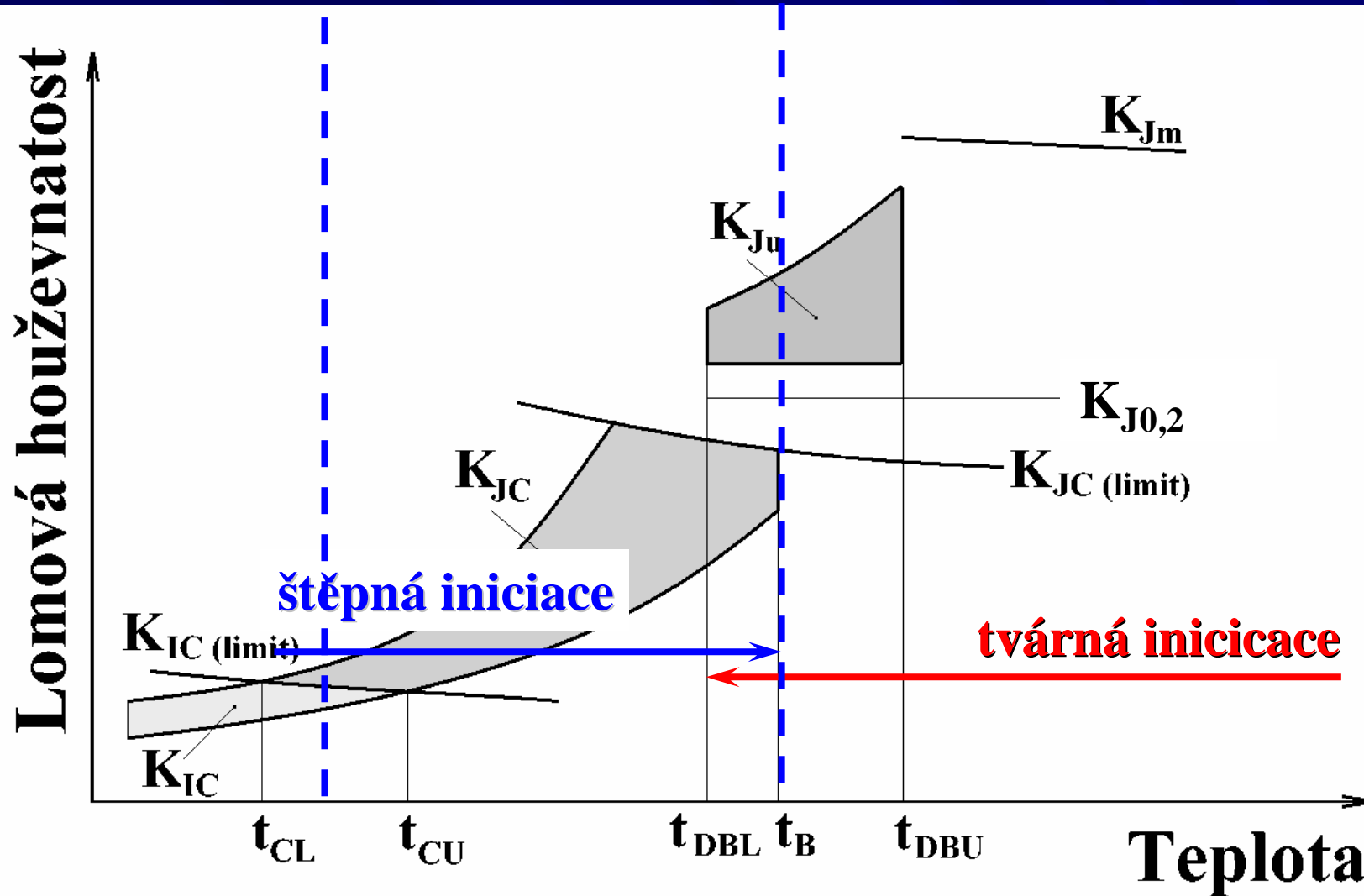


# Teplotní závislost lomové houževnatosti

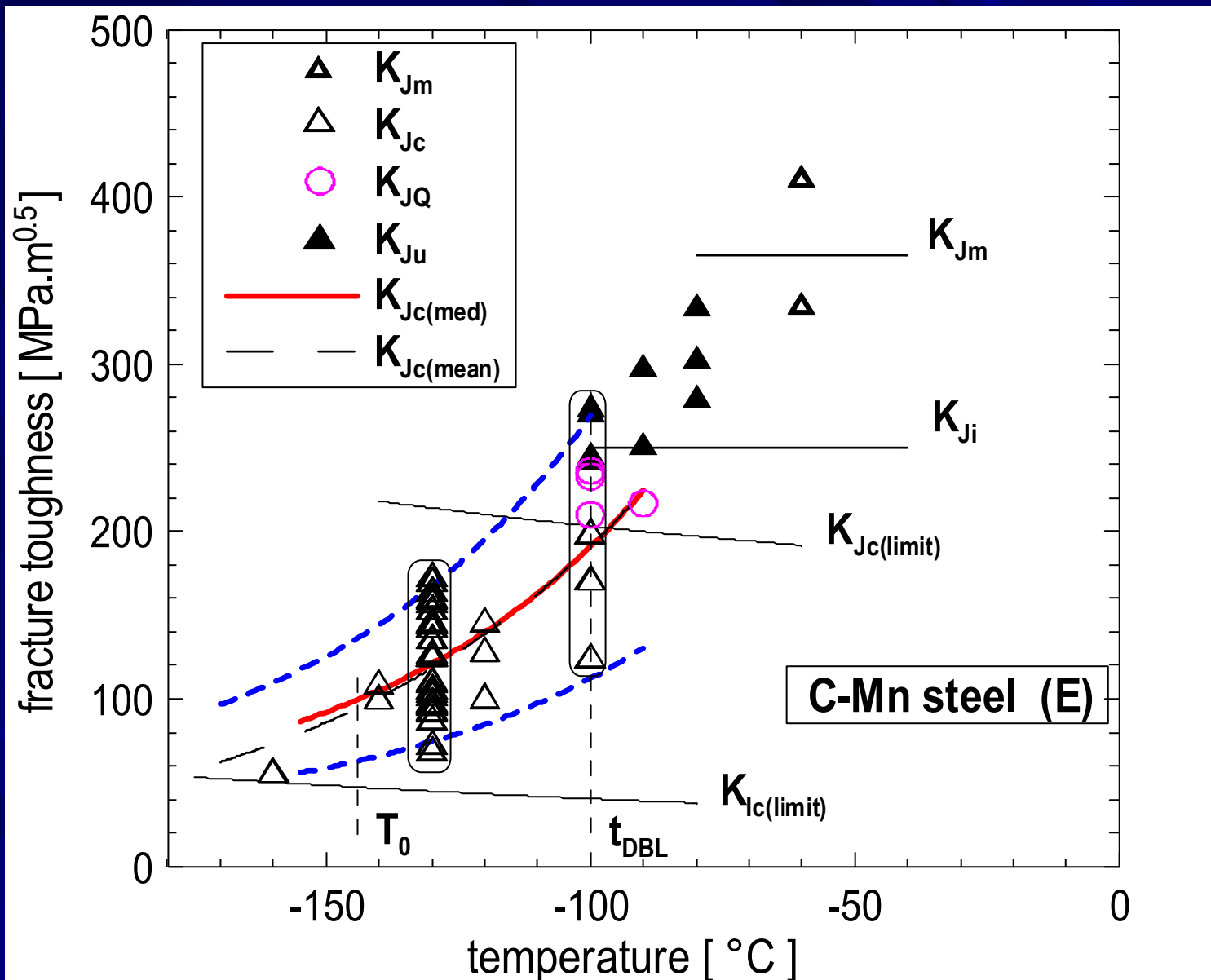
dolní prahová  
oblast

tranzitní  
oblast

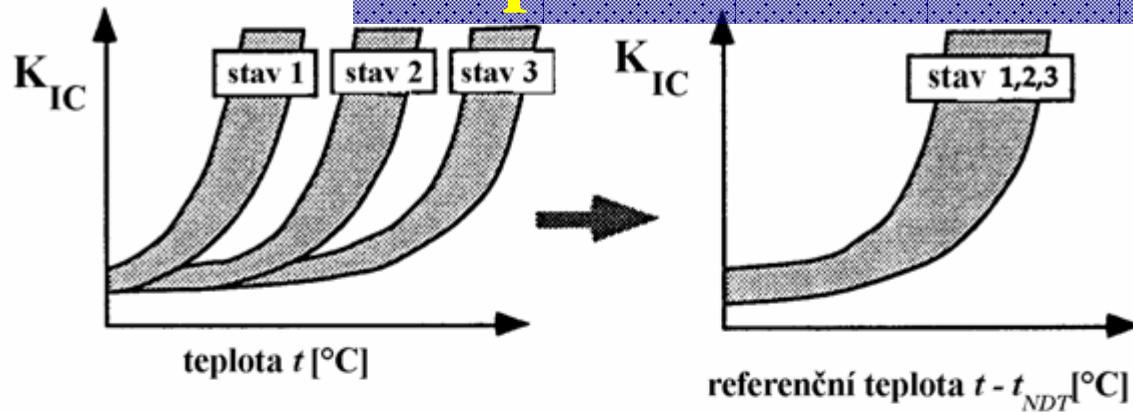
horní prahová  
oblast



# Teplotní závislost lomové houževnatosti

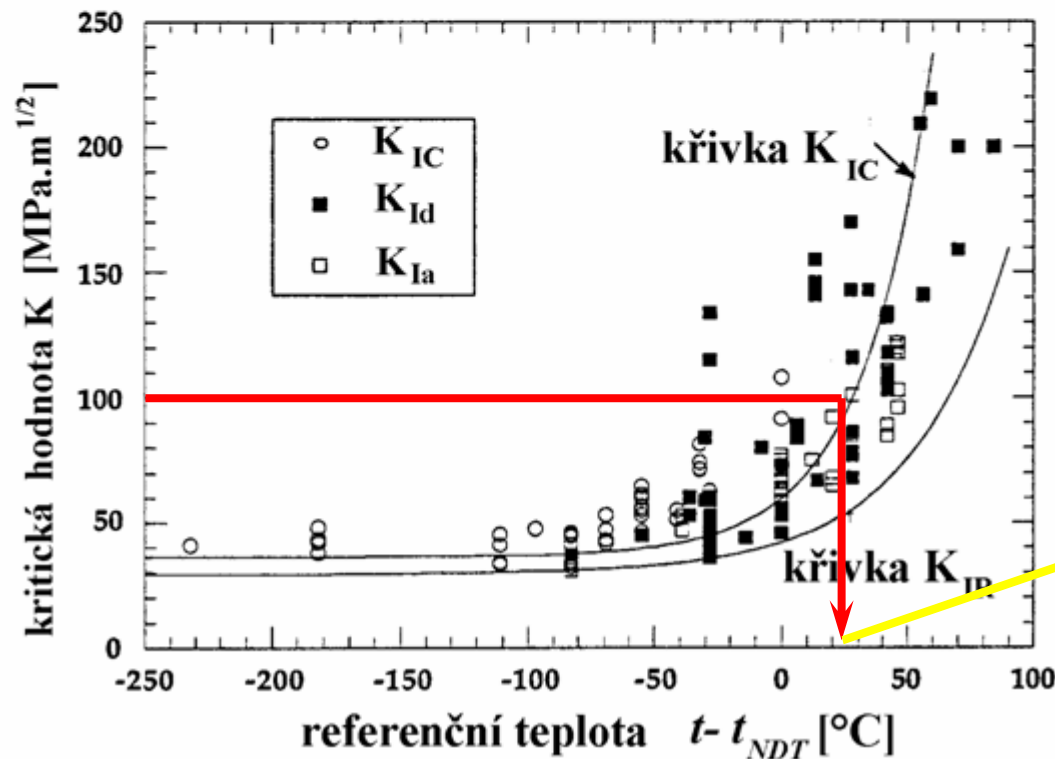


# Teplotní závislost lomové houževnatosti



Milionová  
křivka

Základní  
(master)  
křivka

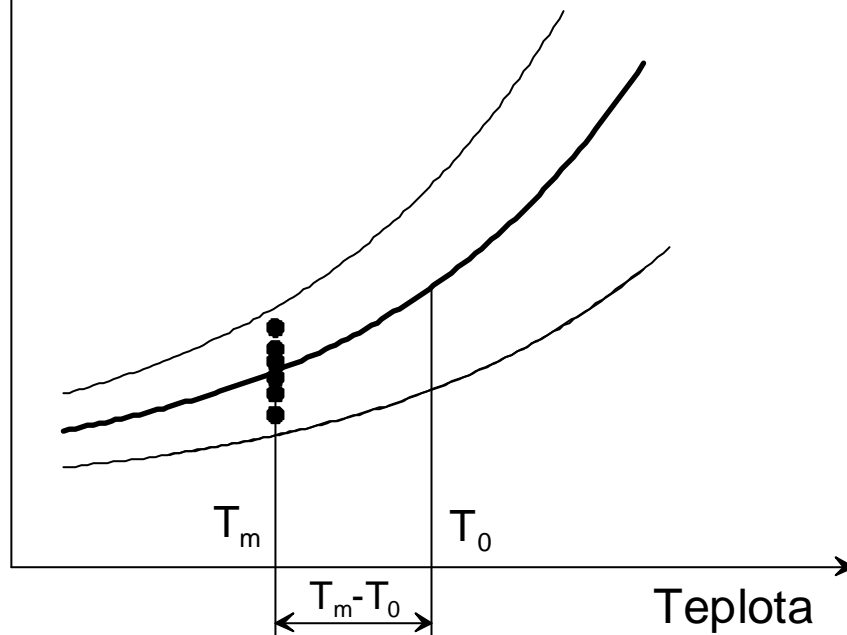


$T_0$

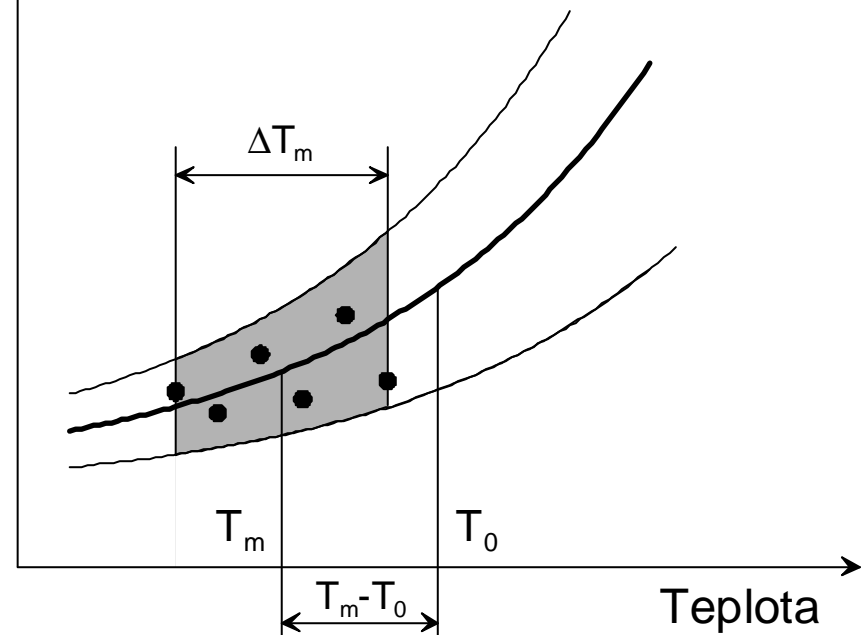
# Teplotní závislost lomové houževnatosti

## ASTM E 1921

Lomová houževnatost



Lomová houževnatost



$$T_0 = T - \frac{1}{0,019} \ln \left[ \frac{K_{Jc(\text{med})} - 30}{70} \right]$$

$$K_{Jc(\text{med})} = K_{\min} + (K_0 - K_{\min}) [\ln(2)]^{1/4}$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\delta_i \cdot \exp\{c \cdot [T_i - T_0]\}}{a - K_{\min} + b \cdot \exp\{c \cdot [T_i - T_0]\}} - \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(17)i} - K_{\min})^4 \cdot \exp\{c \cdot [T_i - T_0]\}}{(a - K_{\min} + b \cdot \exp\{c \cdot [T_i - T_0]\})^5} = 0$$

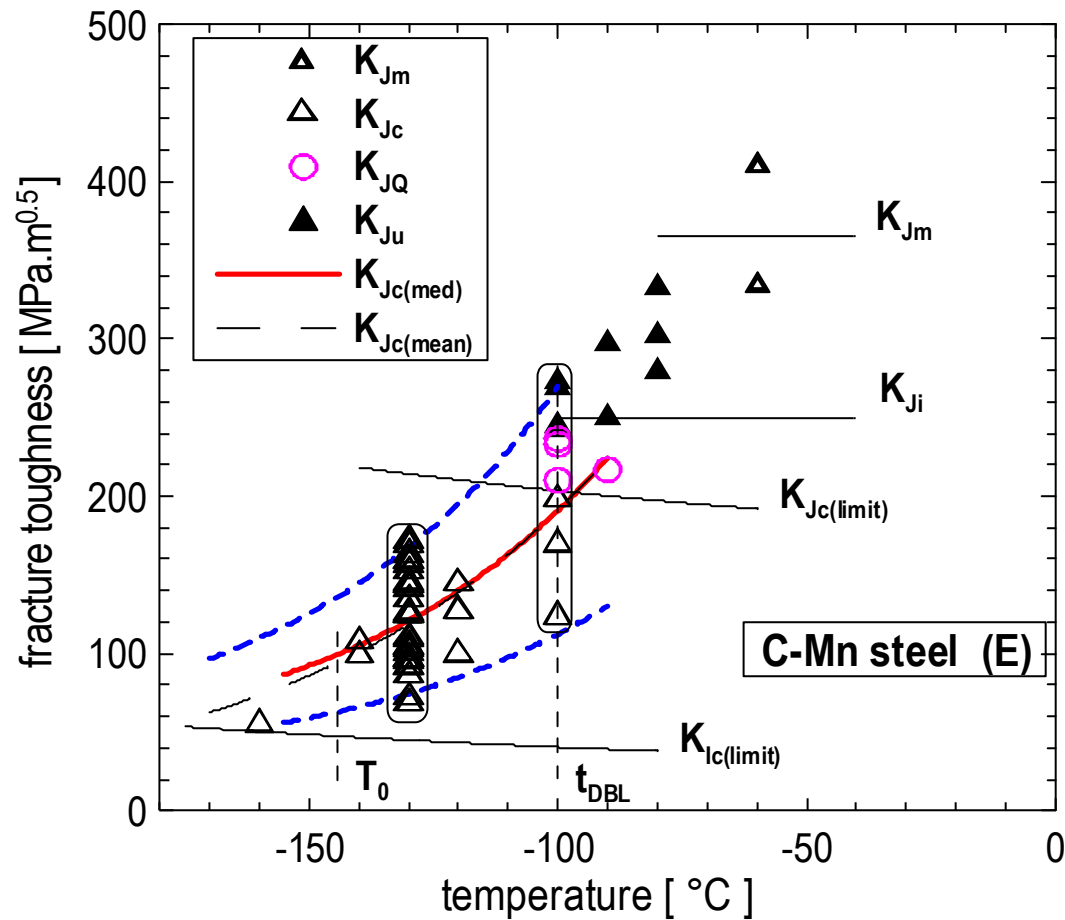
$$K_0 = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc(17)i} - K_{\min})^4}{r - 0,3068} \right]^{1/4} + K_{\min}$$

referenční teplota

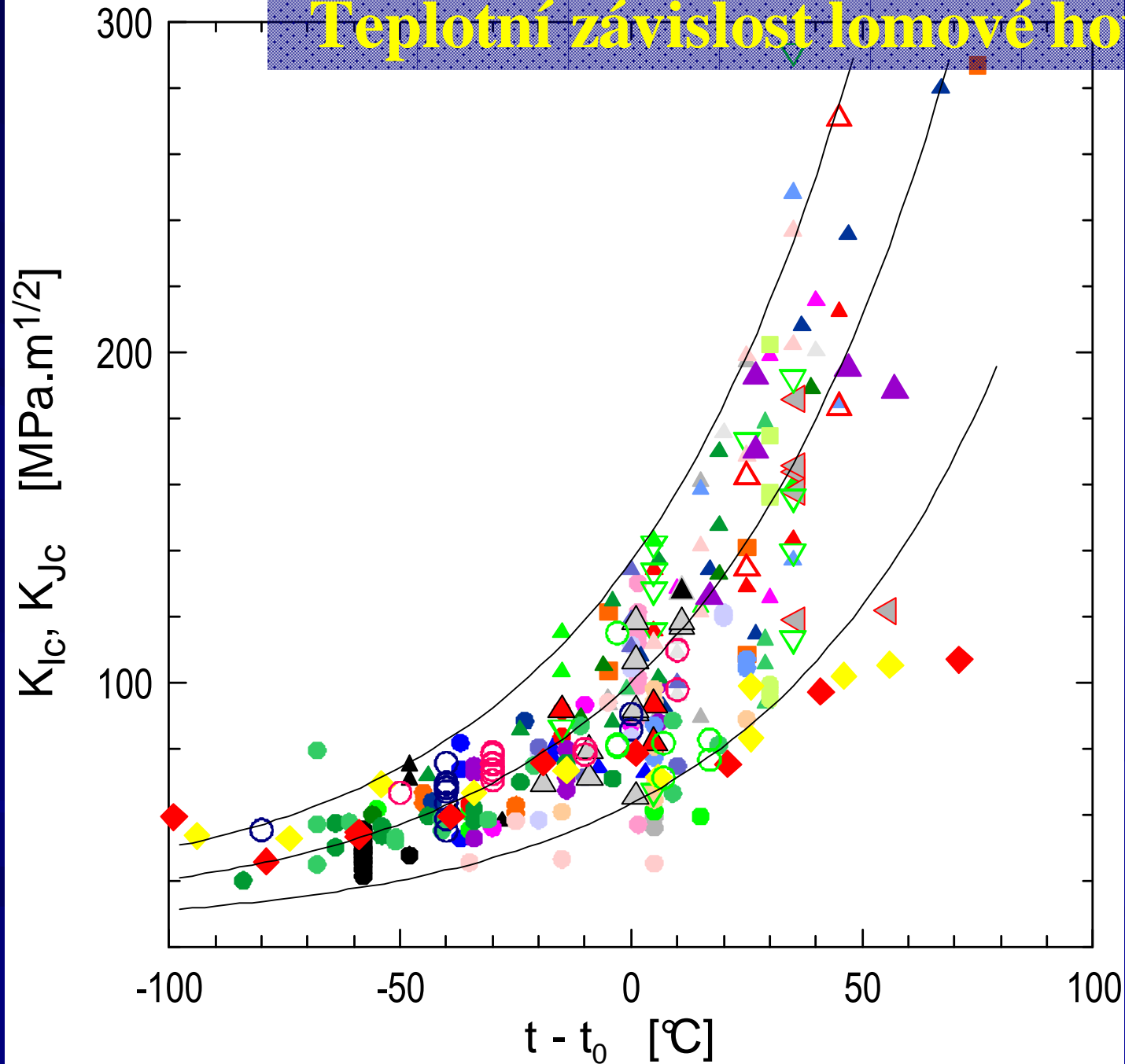
$$K_{Jc(\text{med})} = 30 + 70 \exp[0,019(T - T_0)]$$

$$K_{Jc(0,05)} = 25,4 + 37,8 \exp[0,019(T - T_0)]$$

$$K_{Jc(0,95)} = 34,6 + 102,2 \exp[0,019(T - T_0)]$$



# Teplotní závislost lomové houževnatosti



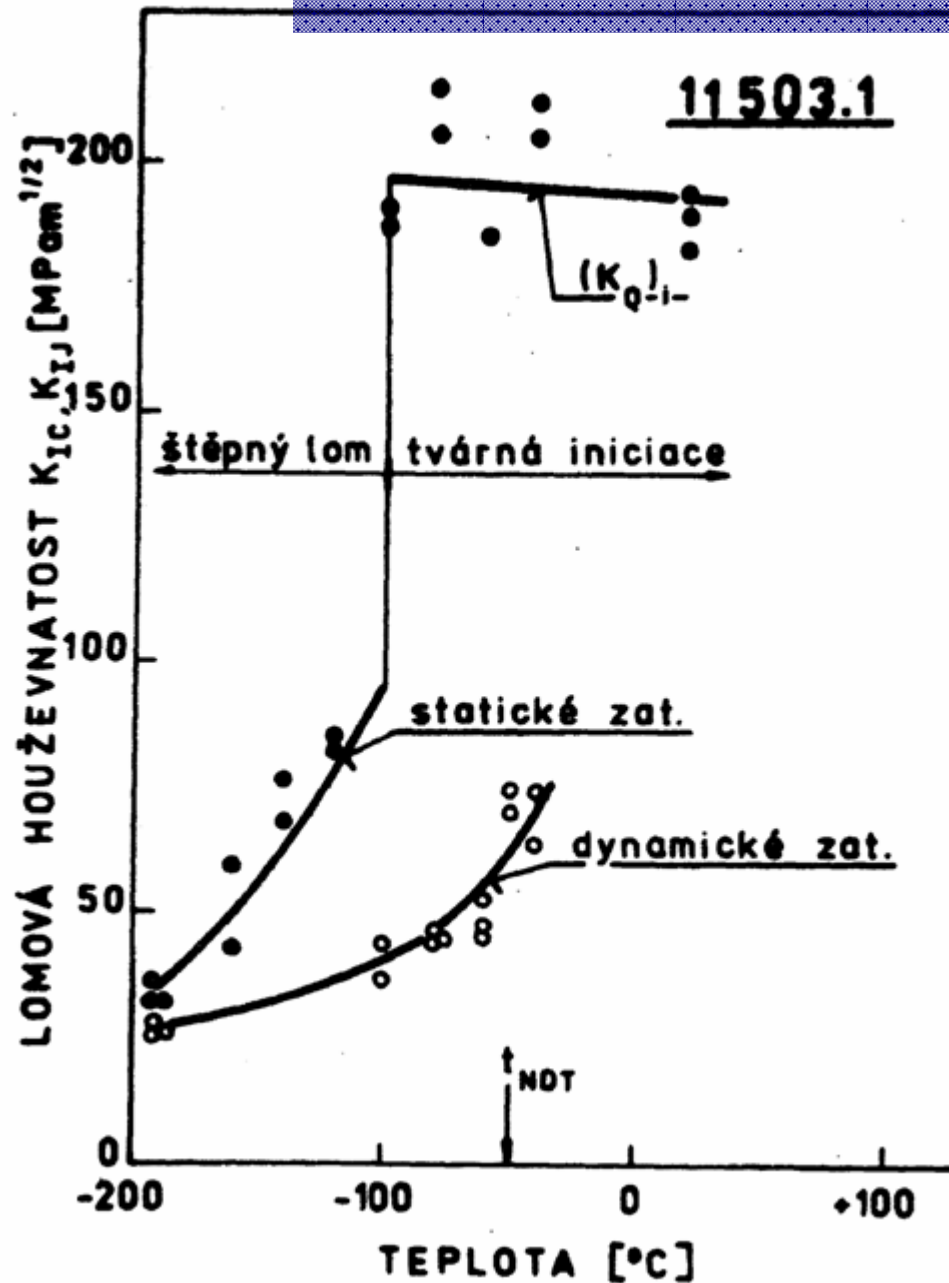
„Dvou -  
miliónová  
křivka“

# Vliv rychlosti na LH

Typ konstrukce	$\dot{\varepsilon}$ [s <sup>-1</sup> ]	$\dot{\Delta}$ [mm.s <sup>-1</sup> ]	$\dot{K}_I$ [MPa.m <sup>1/2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
Nádrže	< 10 <sup>-6</sup>	-	< 1
Tlakové zkoušky nádob, potrubí	< 10 <sup>-5</sup>	-	< 10
Mosty, jeřáby, budovy	10 <sup>-3</sup>	-	~ 10 <sup>3</sup>
Letecké podvozky	-	10 <sup>4</sup>	< 10 <sup>4</sup>
Zemní a stavební stroje	-	10 <sup>3</sup>	< 10 <sup>5</sup>
Kovací lisy	-	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>6</sup>
Kolize lodí	-	10 <sup>4</sup>	< 10 <sup>6</sup>
Silniční a železniční doprava	-	10 <sup>5</sup>	< 10 <sup>6</sup>
Vojenská zařízení při explozi a nárazu projektilu	-	10 <sup>7</sup>	< 10 <sup>10</sup>



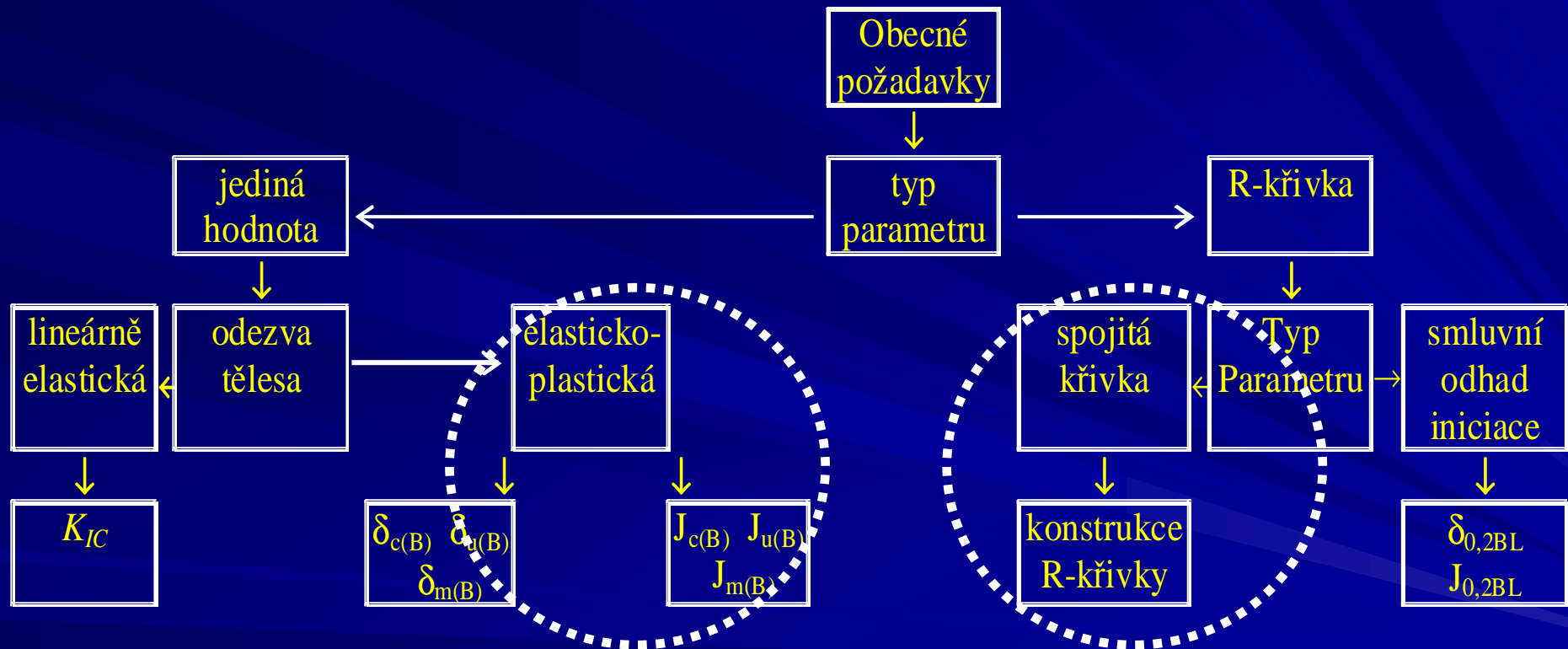
# Vliv rychlosti na LH



*Vliv teploty a rychlosti zatěžování na lomovou houževnatost*

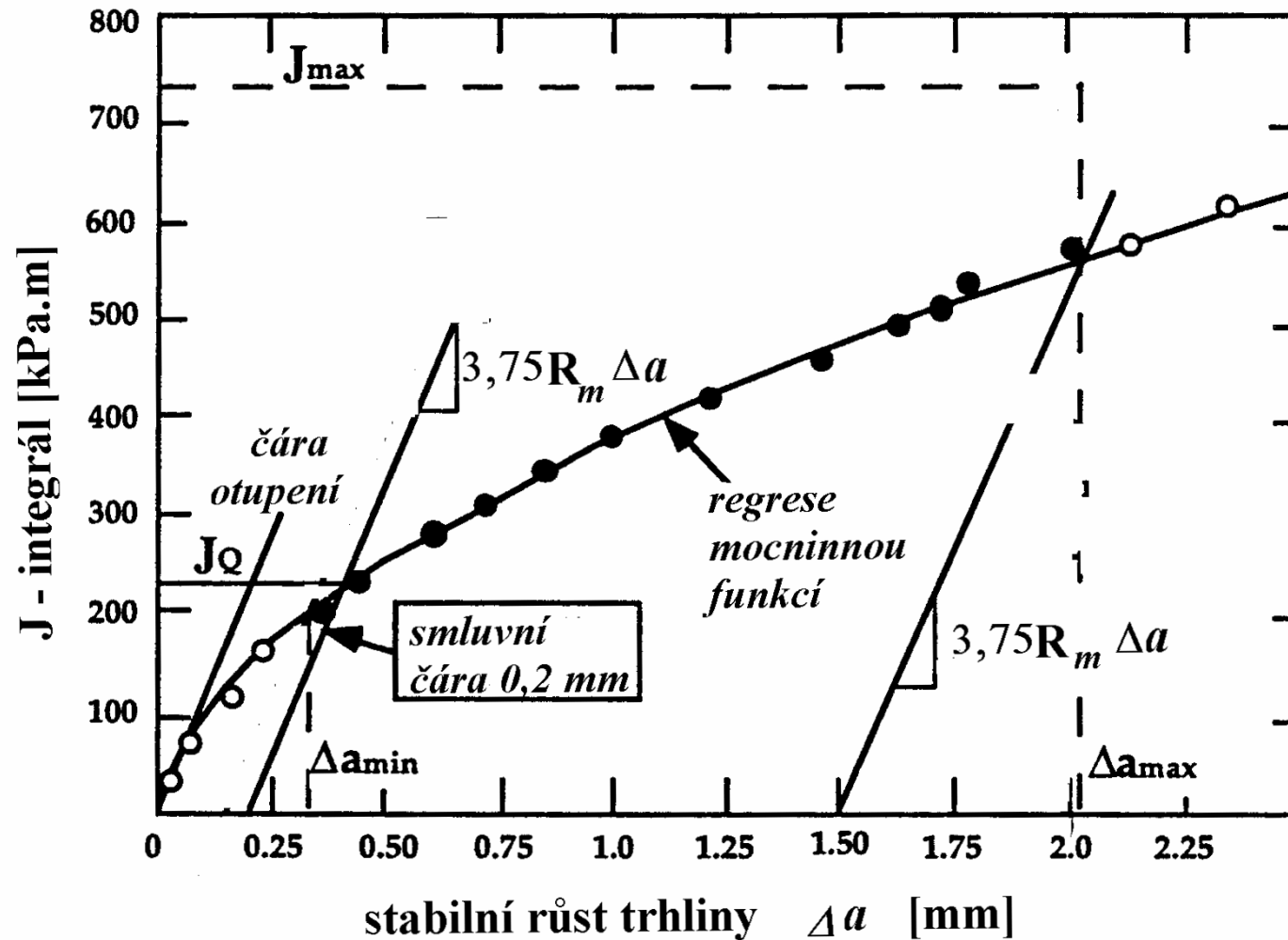
# Elasto - plastická lomová mechanika

Jak se určuje lomová houževnatost ?



# Určení $J_R$ (J- $\Delta a$ ) křivky

## Podmínky šíření trhliny



# Určení $J_R$ ( $J-\Delta a$ ) křivky

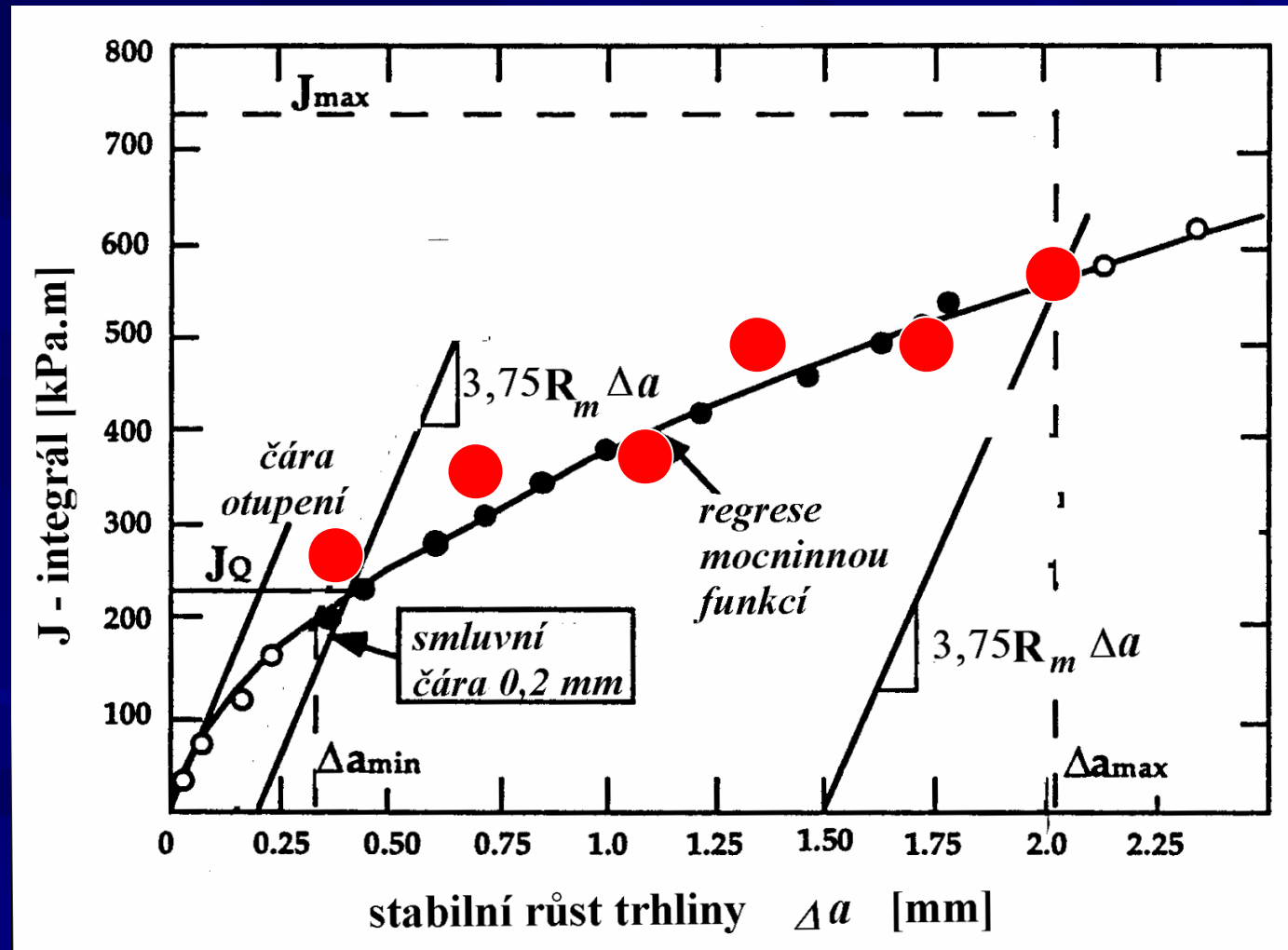
Metoda několika těles

Metoda jednoho tělesa

- přímá (změna poddajnosti)
- nepřímá (měření délky trhliny)

# Určení $J_R$ (J- $\Delta a$ ) křivky

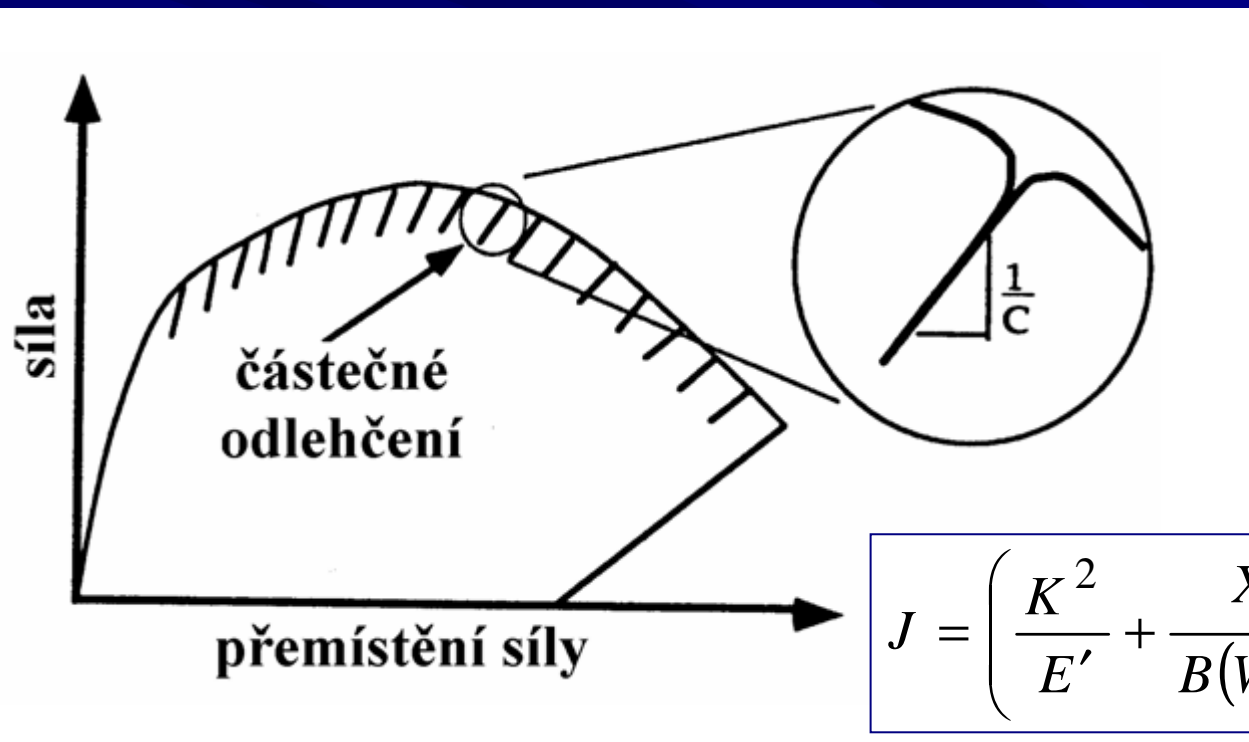
## Metoda několika těles



# Určení $J_R$ (J- $\Delta a$ ) křivky

Metoda několika těles

Metoda jednoho tělesa - přímá (změna poddajnosti)  
- nepřímá (měření délky trhliny)



$$J = \left( \frac{K^2}{E'} + \frac{X_i A_p}{B(W - a_0)} \right) \left( 1 - \frac{\Delta a}{2(W - a_0)} \right)$$

# Určení $J_R$ (J- $\Delta a$ ) křivky

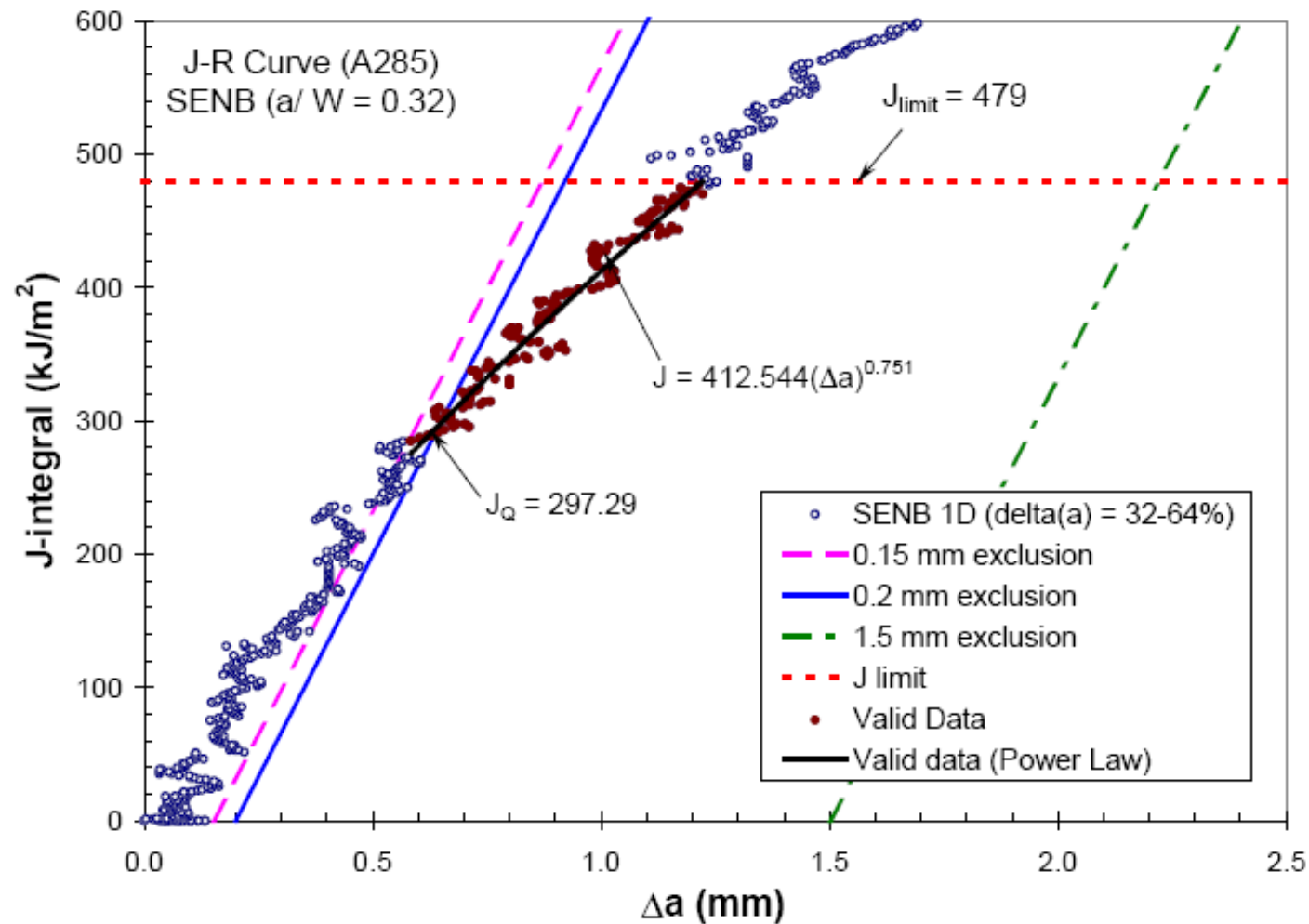


Figure 2. ASTM E 1820 Fracture toughness  $J_Q$  for A285 SENB specimen (a/W = 0.32)

# Elasto - plastická lomová mechanika

Jak se určuje lomová houževnatost ?

