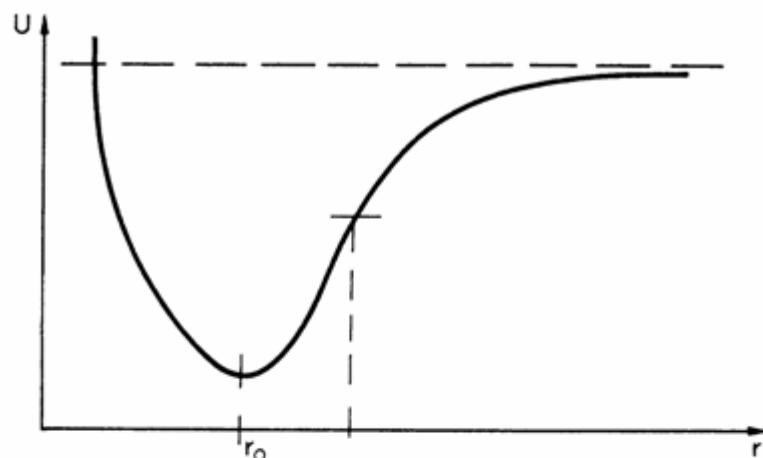


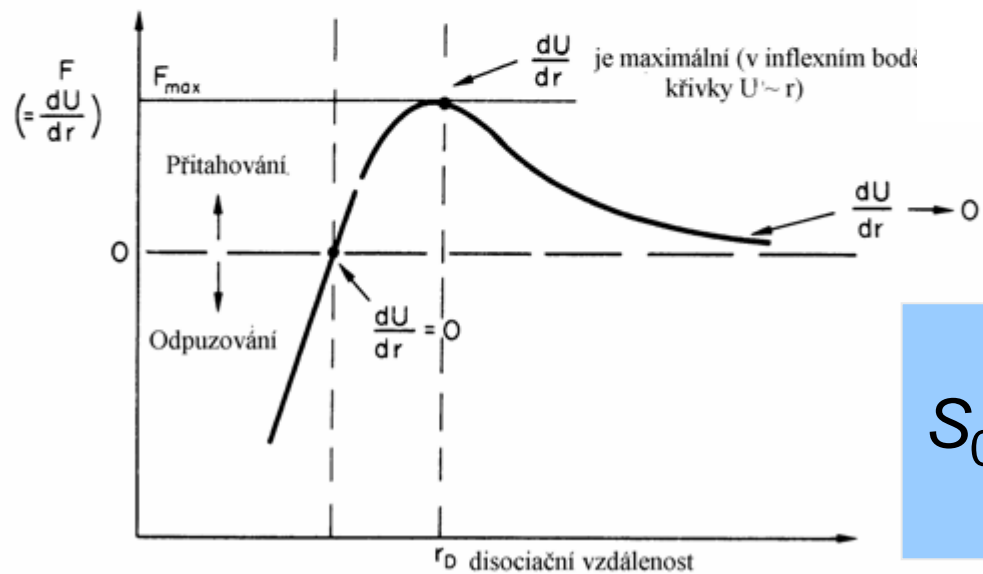
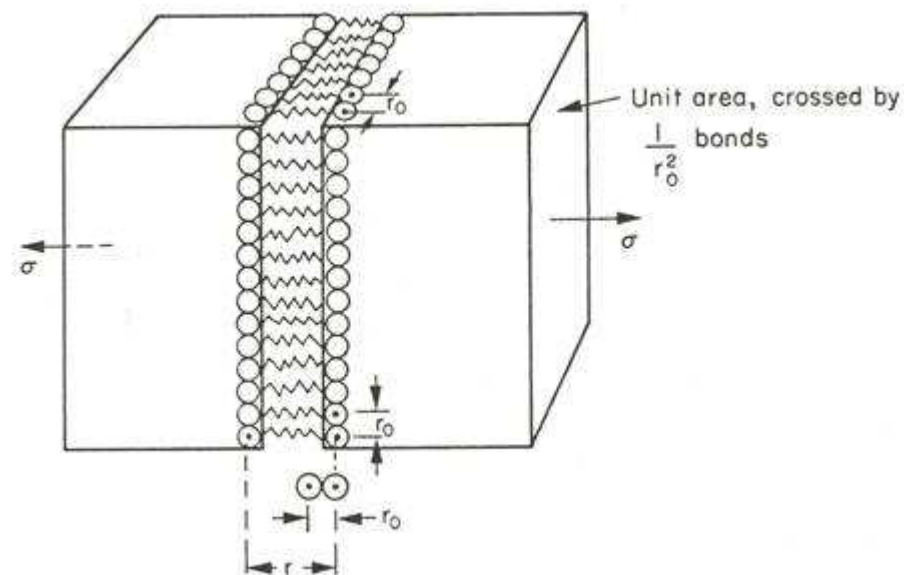
# Plastická deformace a pevnost

- ❖ **Anelasticita – vnitřní útlum**
- ❖ **Zkoušky základních mechanických charakteristik konstrukčních materiálů**  
**(kovy, plasty, keramiky, kompozity)**
- ❖ **Fyzikální podstata pevnosti**
- ❖ **Skutečný tahový diagram**

# Fyzikální podstata modulu pružnosti



$r_0$  mřížkový parametr

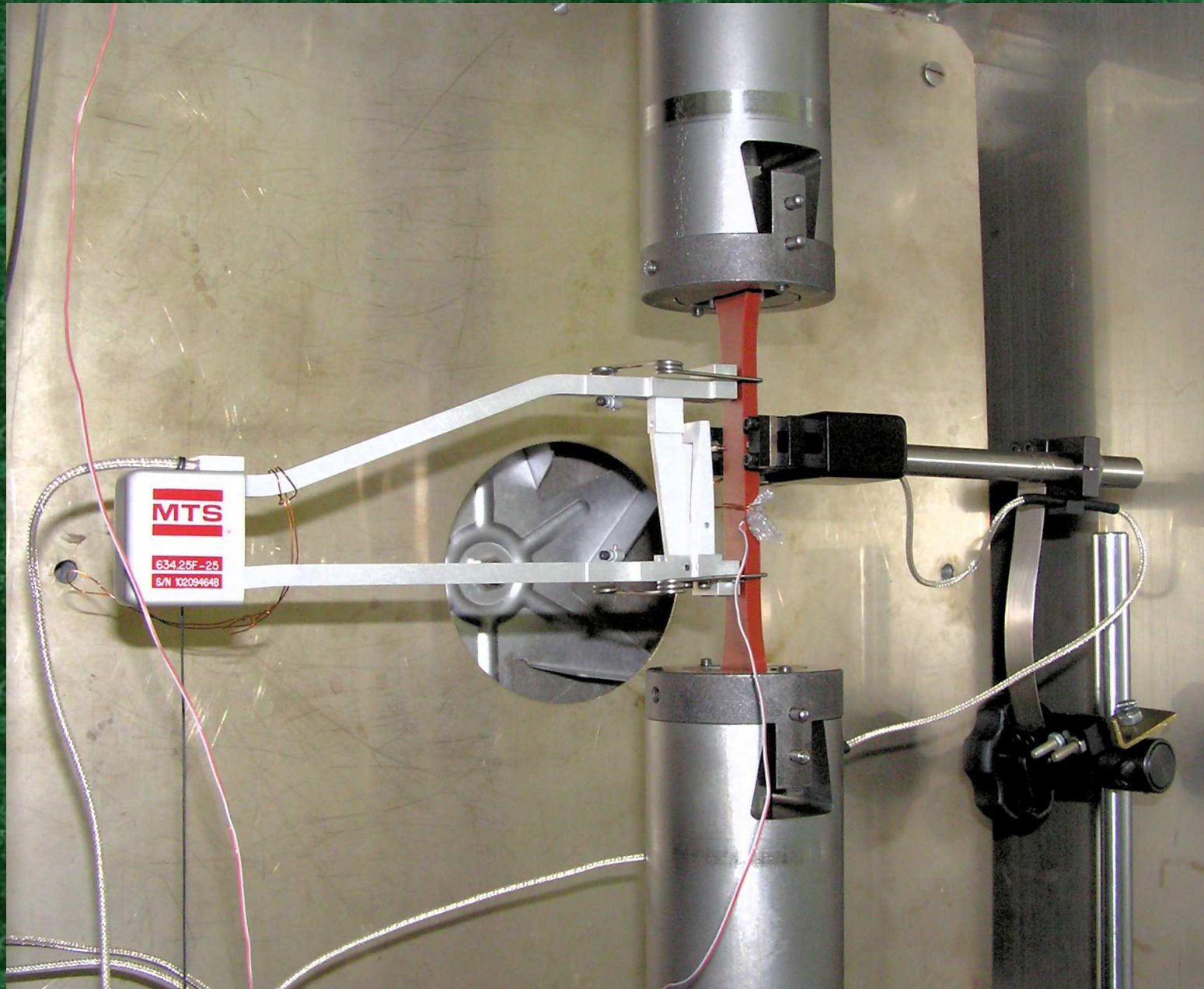


$r_0$  disociační vzdálenost

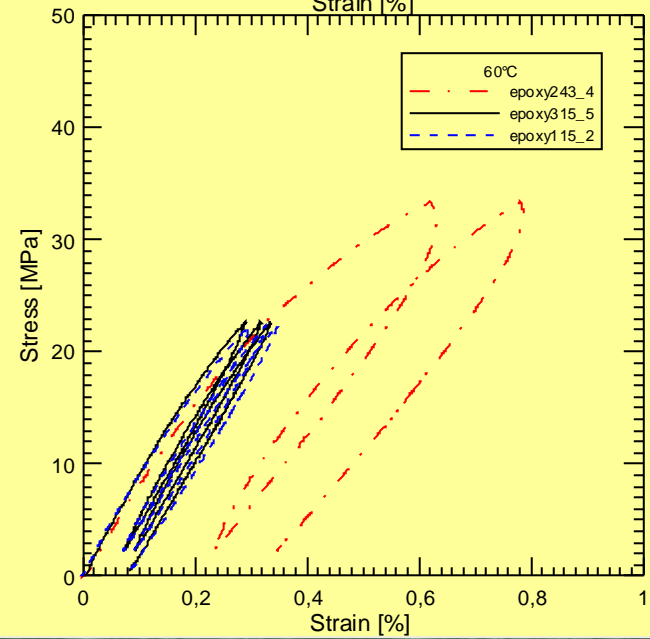
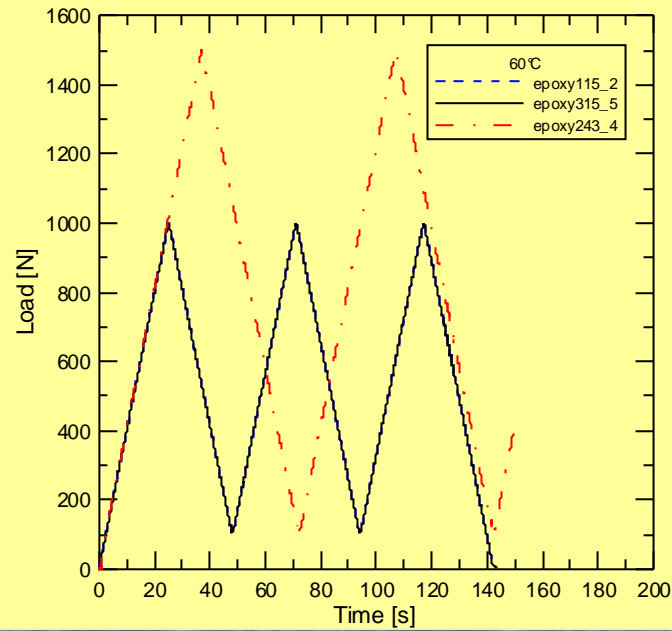
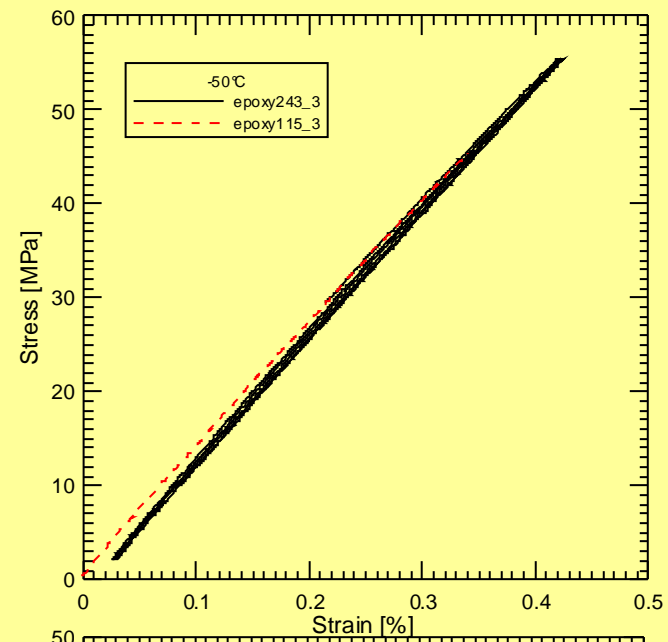
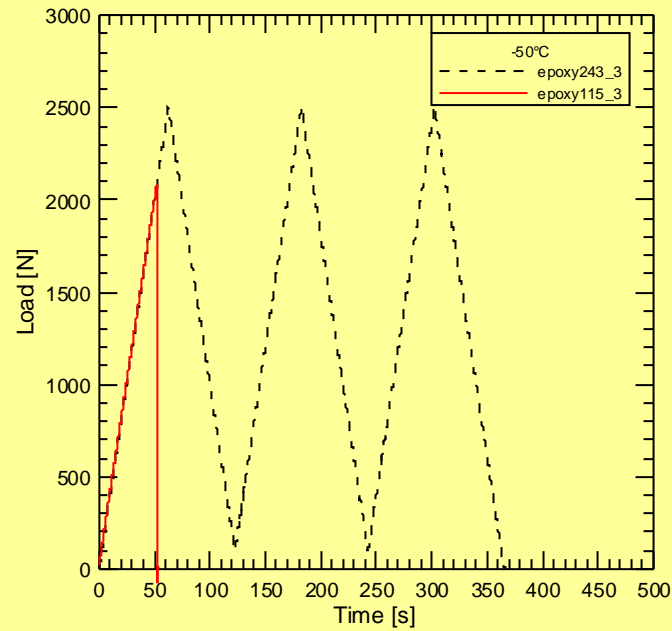
tuhost vazby

$$S_0 = \left( \frac{d^2U}{dr^2} \right)_{r=r_0}$$

# Určování modulu pružnosti

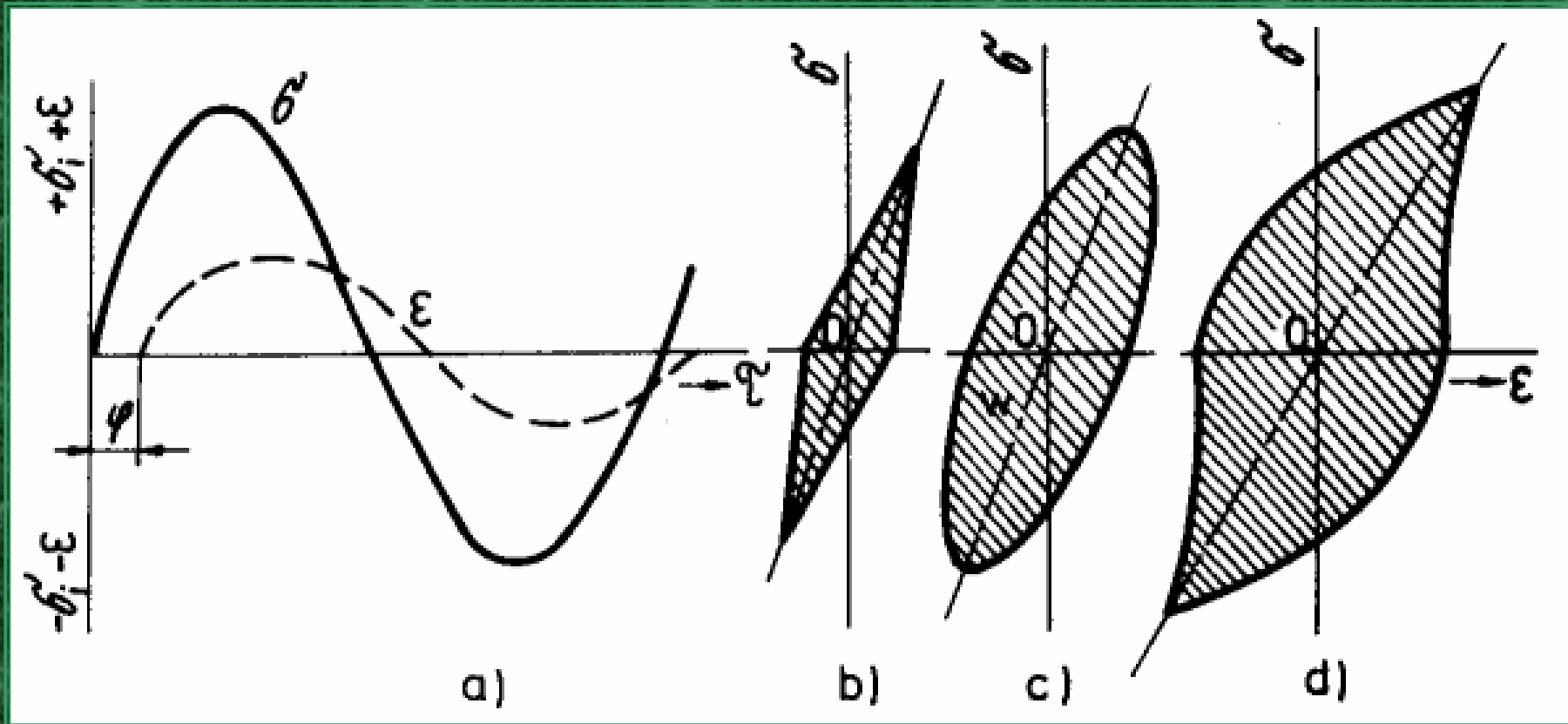


# Kvazistatické metody



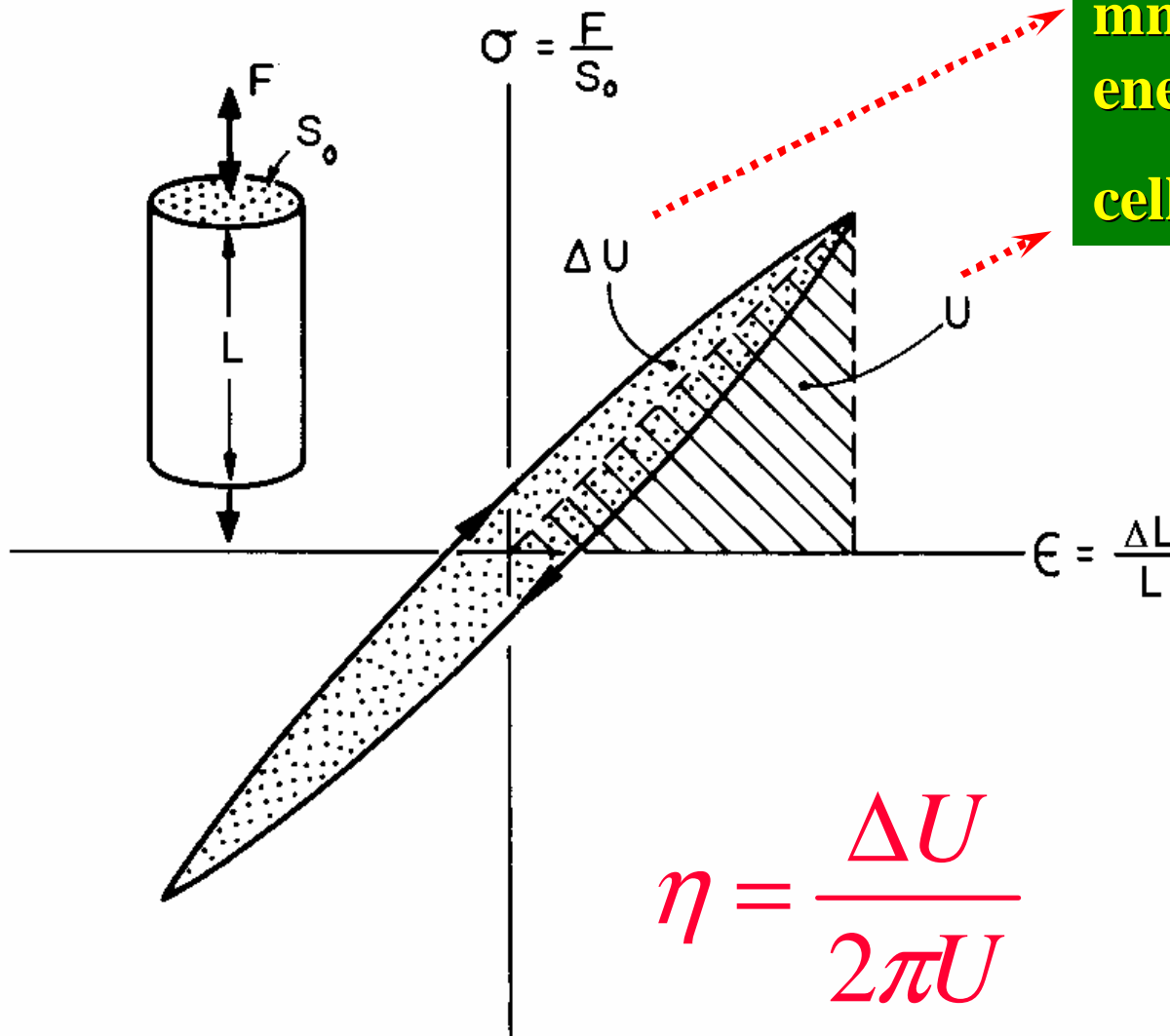
# Hystereze - anelasticita

$$Q^{-1} = \operatorname{tg} \alpha \quad (\text{vnitřní tlumení})$$



schopnost materiálu rozptýlovat elastickou energii při vibracích

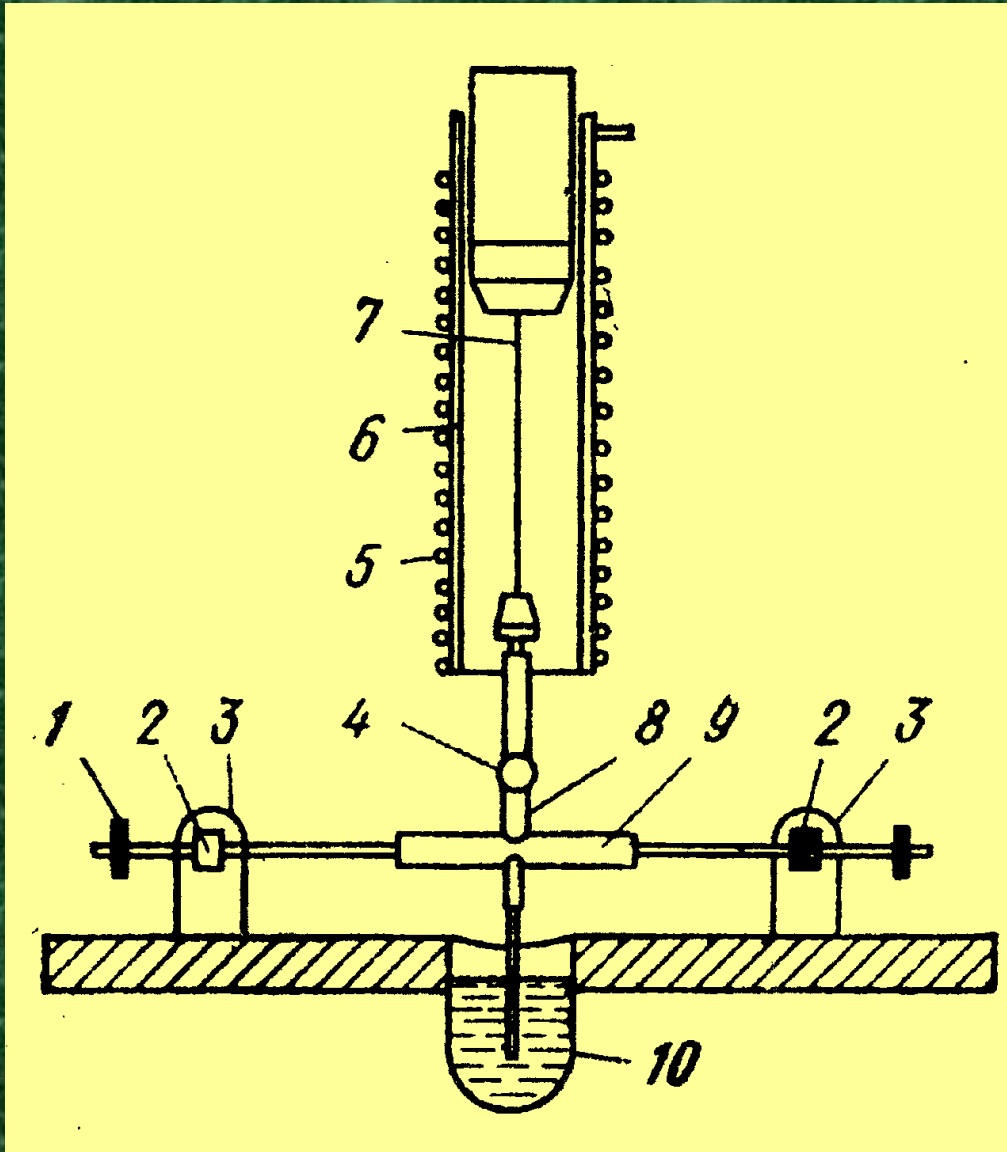
# Vnitřní útlum, vnitřní tření



množství rozptýlené energie (za jeden cyklus)  
celková přivedená energie

$$\eta = \frac{\Delta U}{2\pi U}$$

# Měření charakteristik vnitřního útlumu torzní kyvadlo



$\Delta\omega$  - poloviční šířka píku  
 rezonance v polovině jeho  
 výšky  
 $d$  - průměr vzorku  
 $l$  - délka vzorku

$J_{\omega_0}$  - osový moment setrvačnosti  
 $\omega_0$  - rezonanční kruhová  
 frekvence kmitů kyvadla  
 $f_0$  - vlastní frekv. kmitů kyvadla

$$\eta = \frac{\Delta U}{2\pi U} = \frac{\Delta\omega}{\sqrt{3}\omega_0}$$

## Vnitřní útlum, vnitřní tření

- schopnost materiálu rozptylovat elastickou energii při vibracích
- míra vnitřního útlumu

- koeficient ztrát

$$\eta = \frac{\Delta U}{2\pi U} \quad (Q^{-1})$$

- logaritmický dekrement útlumu

$$\vartheta = \ln \left( \frac{a_n}{a_{n+1}} \right)$$



# Vnitřní útlum, vnitřní tření

- schopnost materiálu rozptylovat elastickou energii při vibracích
- míra vnitřního útlumu
  - koeficient ztrát
  - logaritmický dekrement útlumu

Praktický význam využití: převodovka, blok motoru, řízené střely.....

# Vnitřní útlum, vnitřní tření

fyzikální původ

frekvenčně závislý vnitřní útlum

- termoelastický jev (prodloužení – ochlazení, stlačení – ohřev)
- pohyb valenčních elektronů (při jednotkách K)
- viskozita hranic zrn (Ke - samodifúze)
- difuze uhlíku v tuhém roztoku  $\alpha$ -železa (Snoek)
- změna orientace párových bodových poruch (bivakance apod.)
- relaxace dislokací - Bordoniho maximum
- dynamické vlastnosti dislokací
- relaxační procesy v plastech

# Vnitřní útlum, vnitřní tření

fyzikální původ

frekvenčně nezávislý vnitřní útlum

- chování dislokačních segmentů (dislokací mezi kotvícími body)
- magneto-mechanické tlumení

# Vnitřní útlum, vnitřní tření

význam

frekvenčně závislý vnitřní útlum

zajímá spíše materiálové vědce (jevy podmíněné nějakým relaxačním procesem):

- difuze uhlíku v tuhém roztoku  $\alpha$ -železa (Snoek)
- relaxace v dislokační čáře (Bordoni)
- dynamické vlastnosti dislokací a interakce s překážkami – dislokace lesa, atmosféry, precipitáty, vrstevné chyby)

# Vnitřní útlum, vnitřní tření

význam

frekvenčně nezávislý vnitřní útlum

tato vlastnost zajímává pro konstruktéry

- kolejová vozidla
- převodová skříň
- řízená střela a pod.

vhodné materiály jsou např.

- slitiny hořčíku – vratná dvojčatová deformace
- slitina (Mn-Cu) – vratná martenzitická přeměna
- litina – rozptyl energie na grafitických částicích
- beton – rozptyl na nehomogenní struktuře

# Vnitřní útlum, vnitřní tření

## Volba materiálu pro tabuli (desku) třepacího stroje

(třepací stroj – zkoušení součástí pro auta, letadla)

Materiálové požadavky:

nízká hmotnost  $\rho$

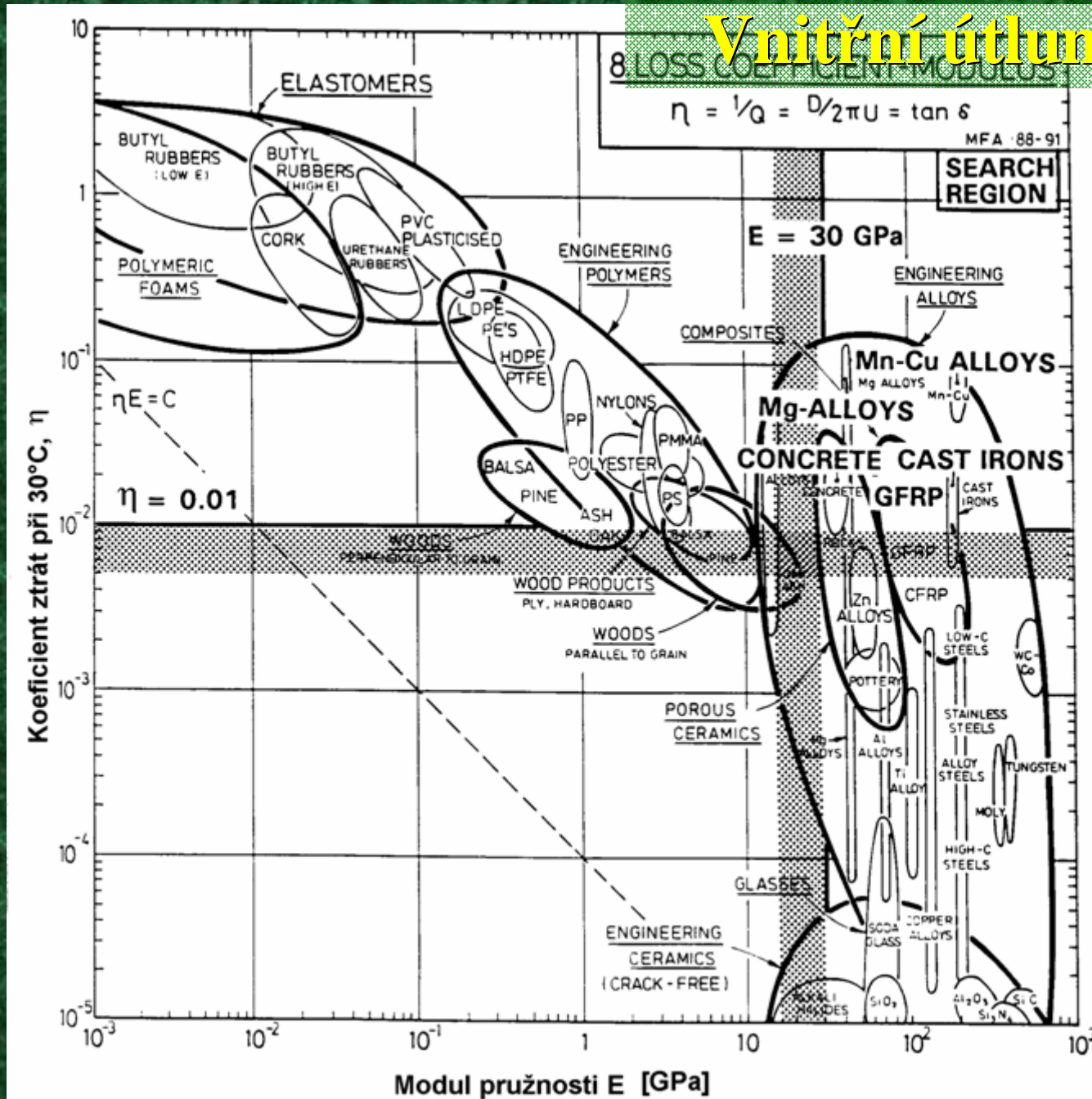
velká tuhost  $E > 30$  GPa

vysoká vlastní frekvence  $(E/\rho)^{1/2}$

vysoký koeficient útlumu  $\eta \approx 10^{-2}$

Materiál	$\eta$	$(E/\rho)^{1/2}$	$\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	Hodnocení
Mg slitiny	$10^{-2} - 10^{-1}$	$5 \cdot 10^3$	1,75	Nejlepší kombinace
slitina Mn-Cu	$10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^3$	8	Útlum dobrý, ale těžký
KFRP/GFRP	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^3$	1,8	Možný
litina	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^3$	7,8	Dobrý/těžký
beton	$2 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^3$	2,5	Možný

# Vnitřní útlum, vnitřní tření



- ✓ **Anelasticita – vnitřní útlum**
- ❖ **Zkoušky základních mechanických charakteristik konstrukčních materiálů**  
**(kovy, plasty, keramiky, kompozity)**
  
- ❖ **Fyzikální podstata pevnosti**
- ❖ **Skutečný tahový diagram**



# Zkouška tahem

**Kovové materiály**

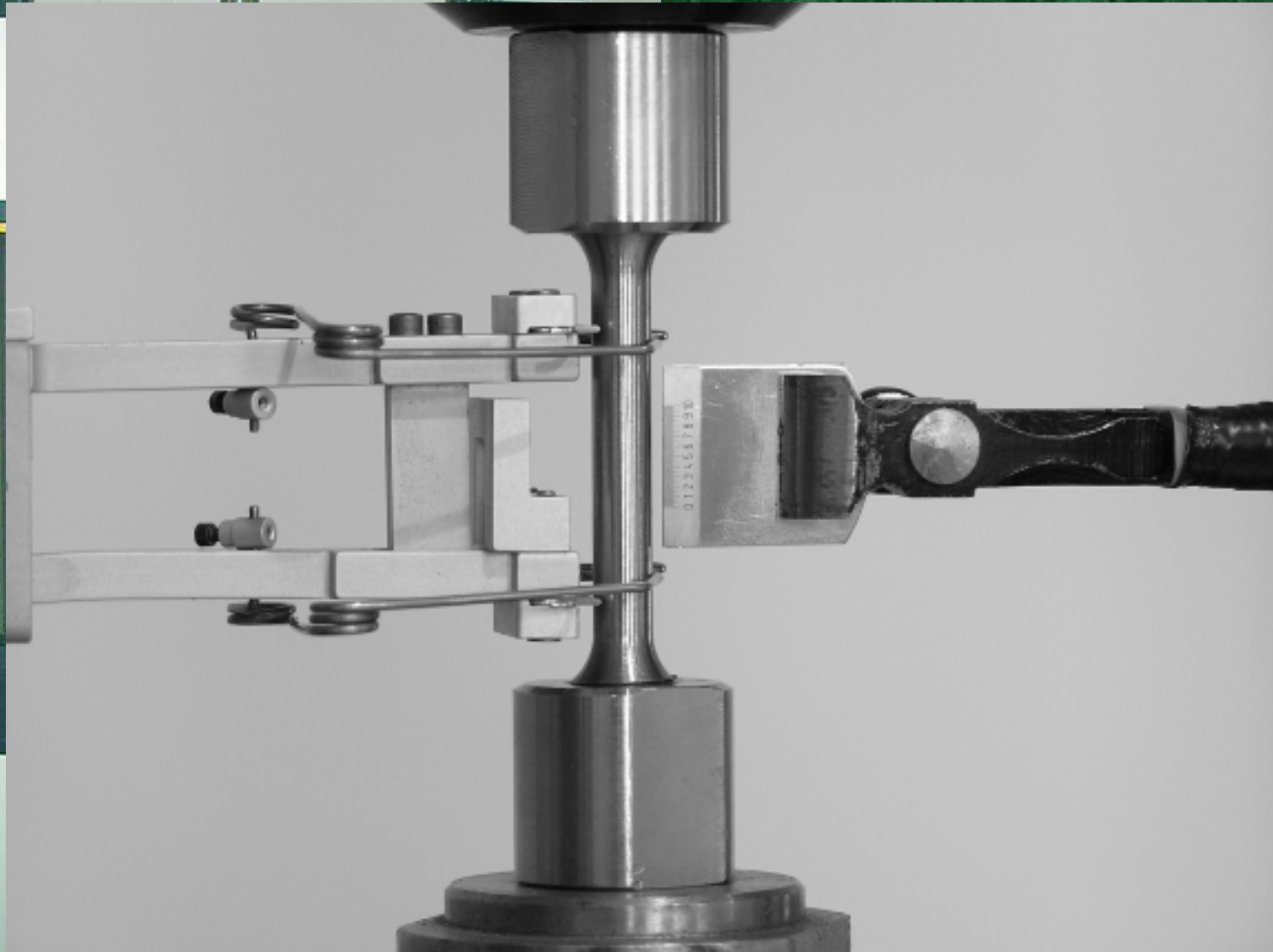
**– Zkouška tahem za okolní teploty**

**Evropa: ČSN EN 10 002 – 1 /2002**

**(42 0310 identifikační znak)**

**Amerika: ASTM E 8 - 01(ASTM E8 M)**

# Zkouška tahem



# EN 10002 se skládá z pěti částí **Zkouška tahem**

**Část 1:** Zkušební metoda za okolní teploty  
ČSN EN 10 002-1 (42 0310)

**Část 2:** Ověřování siloměrného měřicího systému  
tahových zkušebních strojů (ČSN EN ISO  
7500-1), (42 0322)

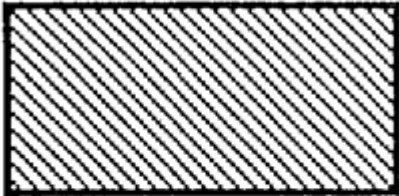
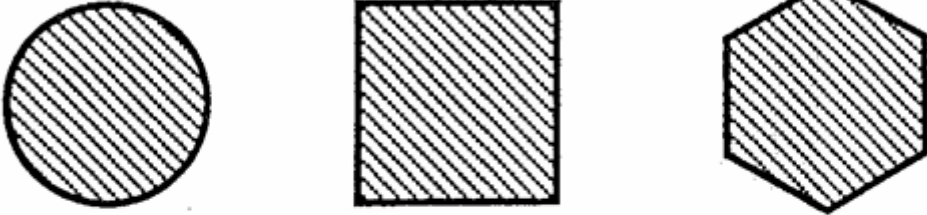
**Část 3:** Kalibrace siloměrů používaných k  
ověřování zkušebních strojů pro zkoušku  
jednoosým tahem (ČSN EN ISO 376) (42  
00358)

**Část 4:** Ověřování průtahoměrů používaných při  
zkoušce jednoosým tahem (ČSN EN ISO  
9513) (42 0386)

**Část 5:** Zkušební metoda za zvýšené teploty  
ČSN EN 10 002-5 (42 0312)

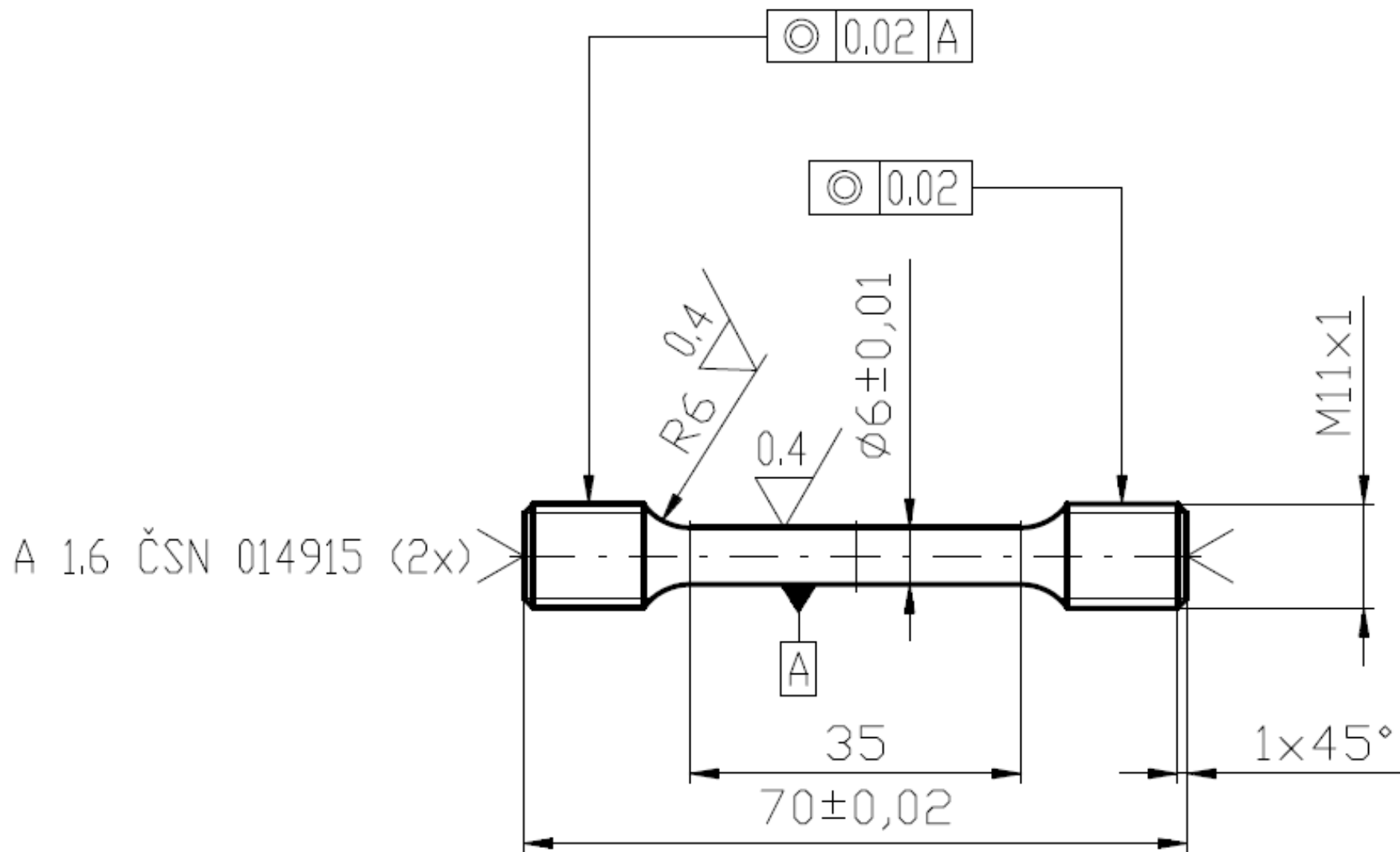
# Zkouška tahem

## Obecná pravidla pro zkušební tyče

Druh výrobku	
<p>Pásky – Plechy – Ploché výrobky</p>  <p>s tloušťkou v milimetrech</p>	<p>Dráty – Tyče – Profily</p>  <p>s průměrem nebo stranou v milimetrech</p>
0,1 ≤ tloušťka < 3	- <b>A50; A80</b>
-	< 4 <b>A200; A100</b>
≥ 3	≥ 4 <b>A5,65; A11,3</b>
Trubky	

# Zkouška tahem

## Obecná pravidla pro zkušební tyče

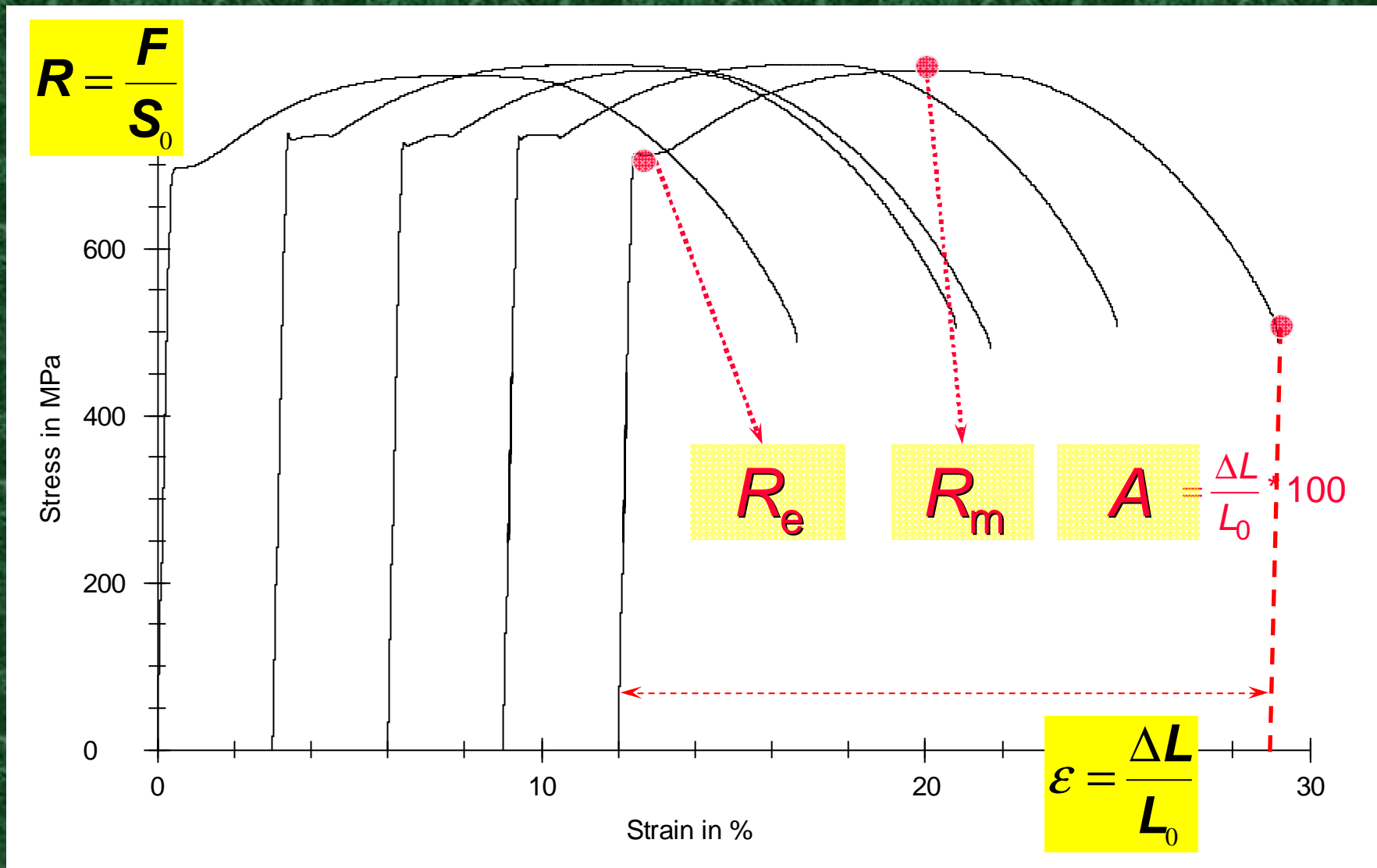


5  
K  
e

## Obecná pravidla pro zkoušku

- ❖ Zatěžovací osa stroje (kardan, vysovací přípravek, upínací přípravky s kulovými plochami apod.)
- ❖ Rychlost zatěžování (podle určované charakteristiky)
- ❖ Kontrola a měření tyče před zkouškou
- ❖ Předtížení tyče v upnutém stavu před zkouškou
- ❖ Provedení zkoušky – se snímačem, bez snímače (hystereze, vícerychlostní zkouška)

# Zkouška tahem



# Zkouška tahem

č. vz.	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	A [%]	E (t) [GPa]	E (s) [GPa]	$\mu$ [ - ]
1	28,29	695,5	806,9	7,49	16,40	206,0	196,0	0,287
2	28,30	722,6	812,8	6,64	14,53	210,3	196,0	0,296
3	28,28	730,0	820,0	7,67	18,46	222,4	196,0	0,295
4	28,29	733,0	820,5	7,37	15,70	204,0	195,7	0,299
5	28,29	711,9	812,5	7,64	16,94	188,6	196,0	0,304



## Smluvní tahový diagram

tj. závislost zátěžná síla – prodloužení  
měřené délky zkušebního tělesa

- napět'ové charakteristiky  $R_{xx}$ ,  $R_m$
- deformační charakteristiky  $A$ ,  $Z$

## Smluvní tahový diagram

měříme sílu  $F$   
přepočteme na smluvní napětí

$$R = \frac{F}{S_0}$$

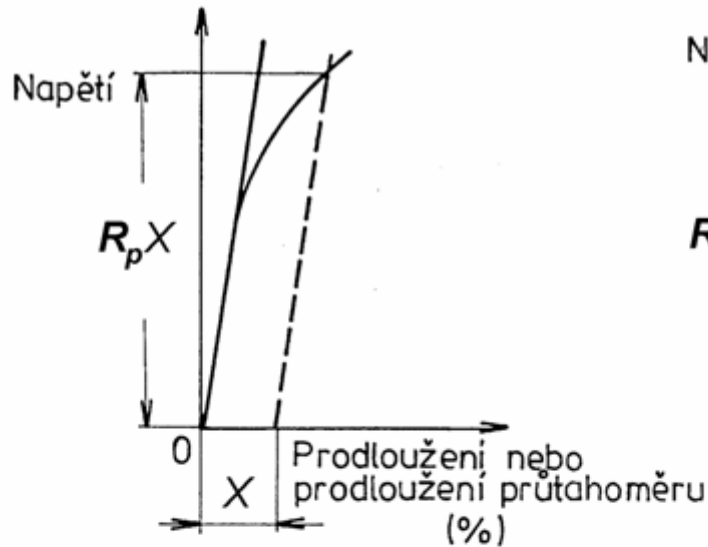
měříme prodloužení  $\Delta L$   
přepočteme na poměrné prodloužení

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

## Smluvní mez kluzu

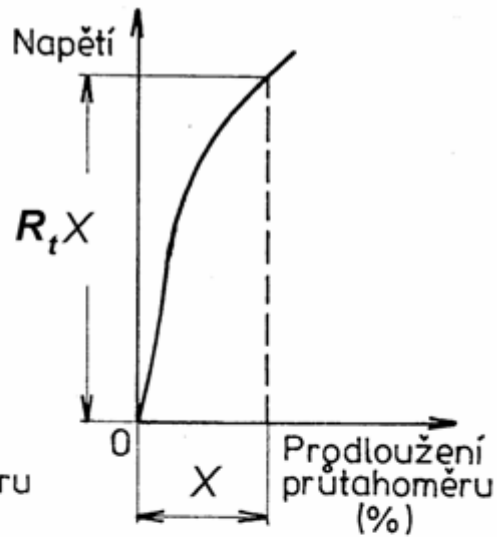
- $p$  = plastic - plastická deformace
- $t$  = total – celková deformace
- $r$  = running - průběžná, trvalá (plastická) deformace

# Zkouška tahem



Poznámka: X je velikost plastické deformace, nejčastěji  $X = 0,2 \%$

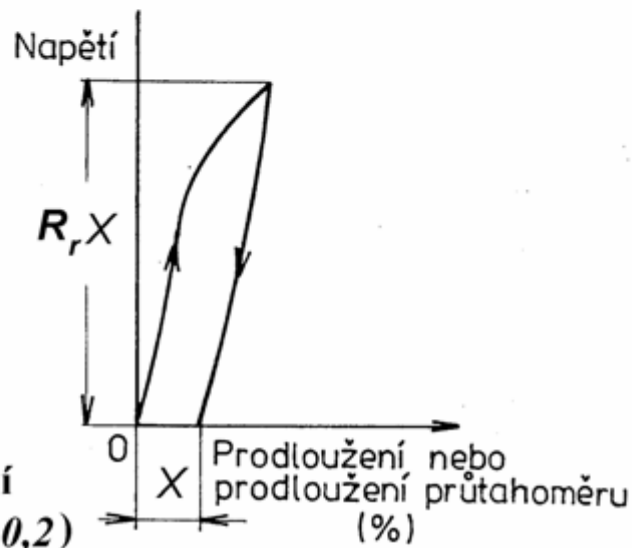
**Smluvní mez kluzu ( $R_p 0,2$ )**



Poznámka: X je velikost celkové deformace, nejčastěji  $X = 0,5 \%$

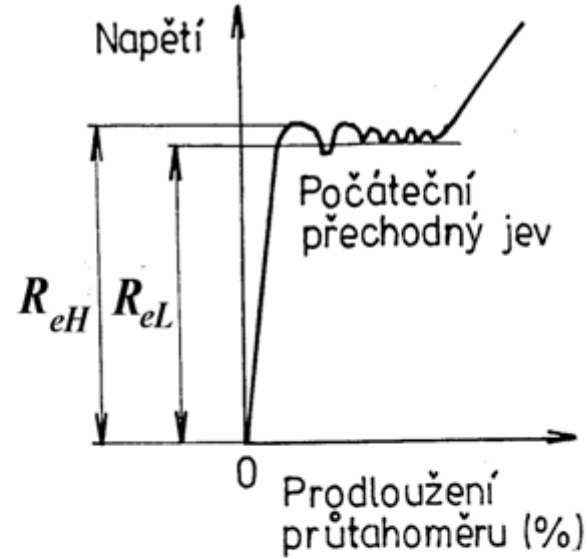
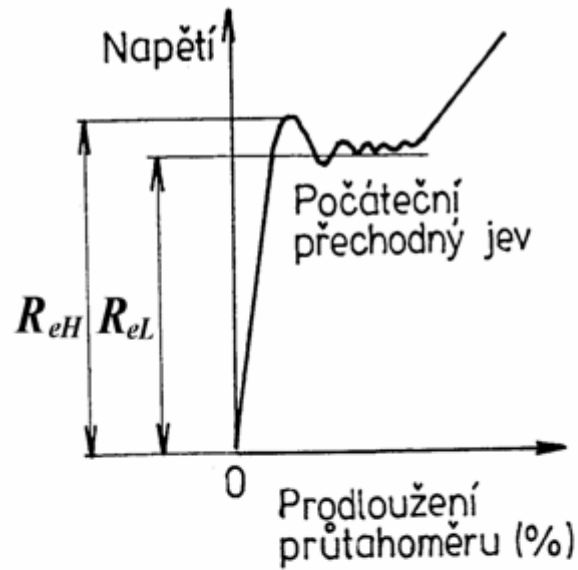
**Smluvní mez kluzu celková ( $R_t 0,5$ )**

$R_p 0,2$

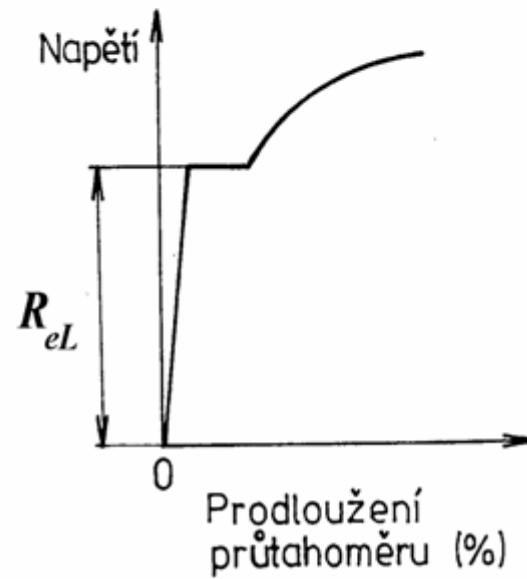
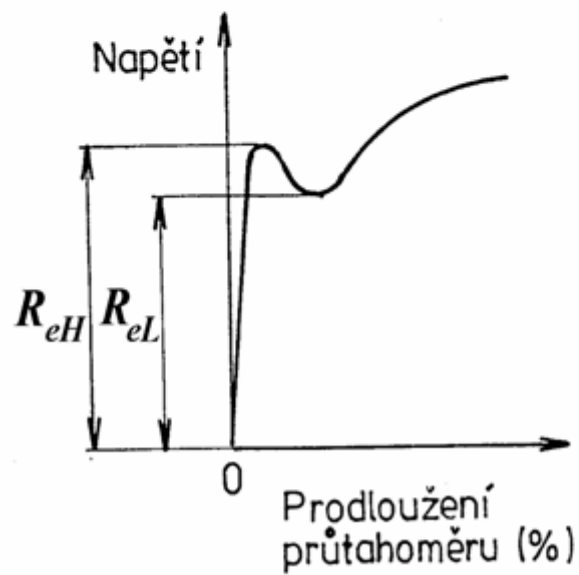


**Trvalá smluvní mez kluzu ( $R_r 0,2$ )**

# Zkouška tahem



$R_{eH}$ ,  $R_{eL}$



$R_e$

## Označování ocelí (horní/dolní mez kluzu)

### Svařitelné oceli

S185

S235

S275

S355

### Oceli na strojní součásti

E295

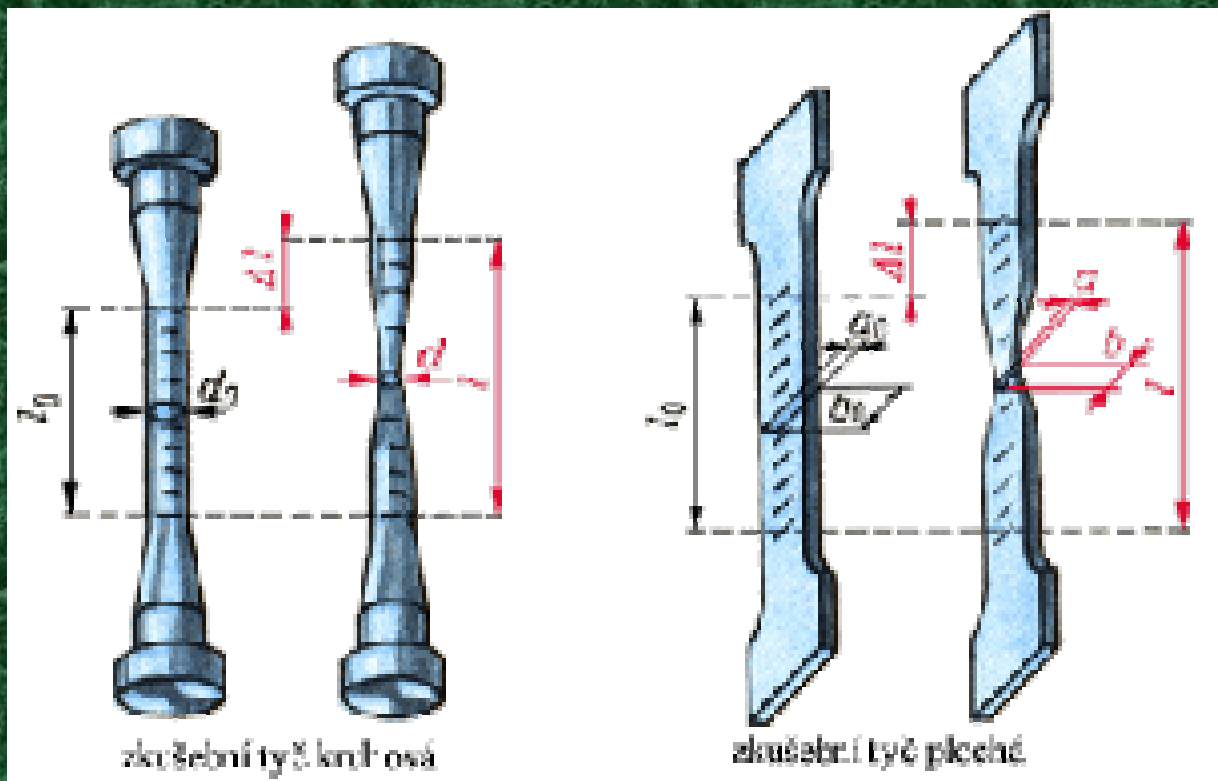
E335

E360

## Deformační charakteristiky

- Zúžení

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100[\%]$$



0[%]

stiky dvě?

## ČSN EN ISO 2566 (420308)

- Převodní tabulky tažnosti

Část 1: uhlíkové a nízkouhlíkové oceli

$$k^I = \frac{L_0^I}{\sqrt{S_0^I}}, k^{II} = \frac{L_0^{II}}{\sqrt{S_0^{II}}}$$

$$\frac{A^{II}}{A^I} = \left( \frac{k^I}{k^{II}} \right)^{0,4}$$

Necht'  $k^I = 5,65$ ,  $k^{II} = 11,3$  pak platí  $A_{11,3} = A_{5,65} \cdot 0,759$ )

Část 2: austenitické oceli



## Energetické charakteristiky

- Kovy – klasický tahový diagram

**Resilience (modul resilience):** mater. charakt. vyjadřující množství energie v jednotce objemu materiálu zatíženého napětím  $R_e$ .

(Množství energie, které je materiál schopen při daném zatížení akumulovat).

$$w_{el} = \frac{R_e^2}{2E} \left[ MPa = \frac{MN \cdot m}{m^2 \cdot m} = \frac{MJ}{m^3} \right]$$

$$w_f = \frac{R_m + R_e}{2} \cdot \frac{A}{100} \left[ \frac{MJ}{m^3} \right],$$

$$w_f = \frac{2}{3} R_m \cdot \frac{A}{100} \left[ \frac{MJ}{m^3} \right]$$

Křehké materiály

**Tahová houževnatost (modul houževnatosti):**  
množství energie potřebné k porušení materiálu

## Zkouška tahem

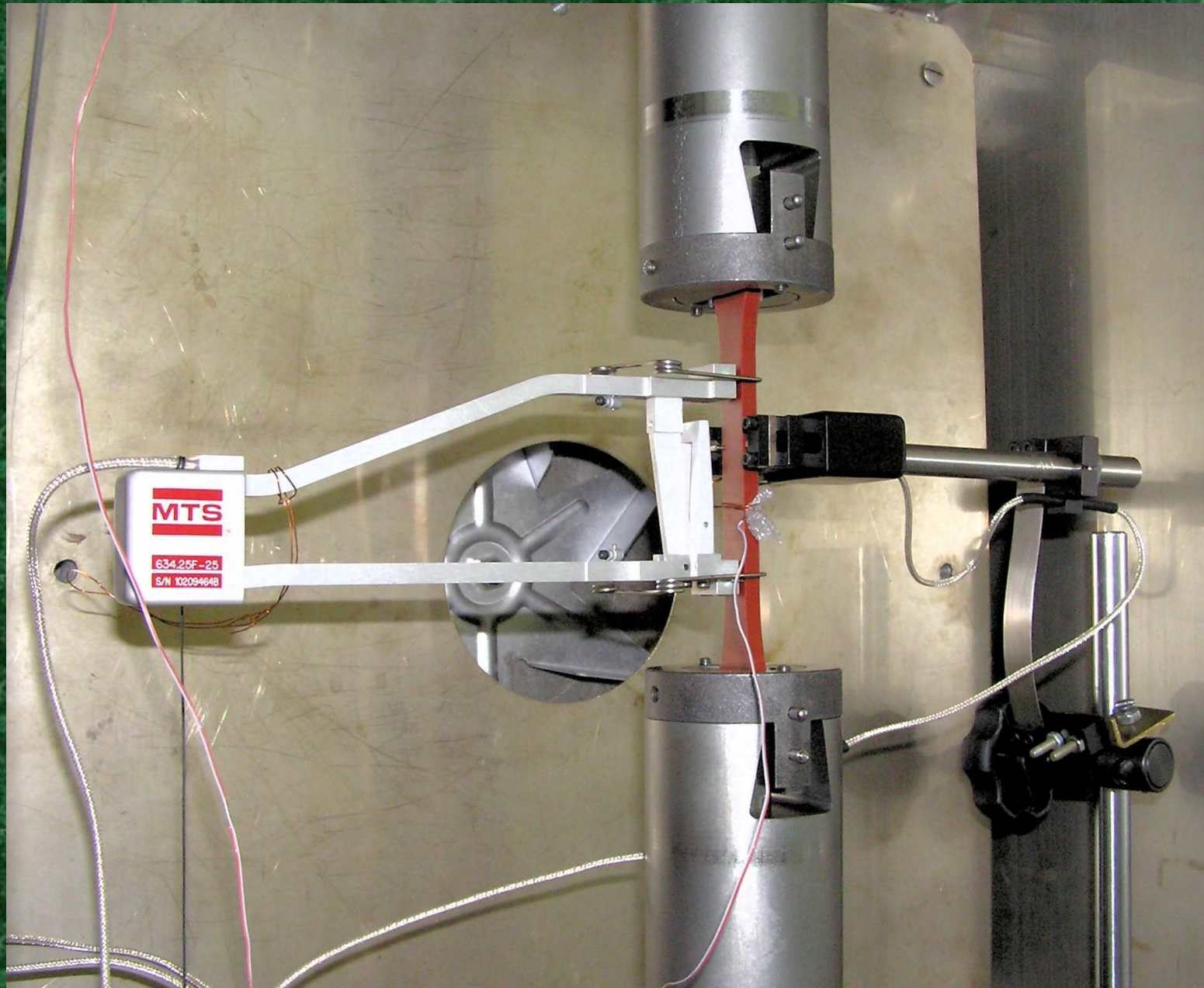
### Kovové materiály – deformační zpevnění

- Kovy – klasický tahový diagram
- Mírou deformačního zpevnění je poměr meze pevnosti a meze kluzu

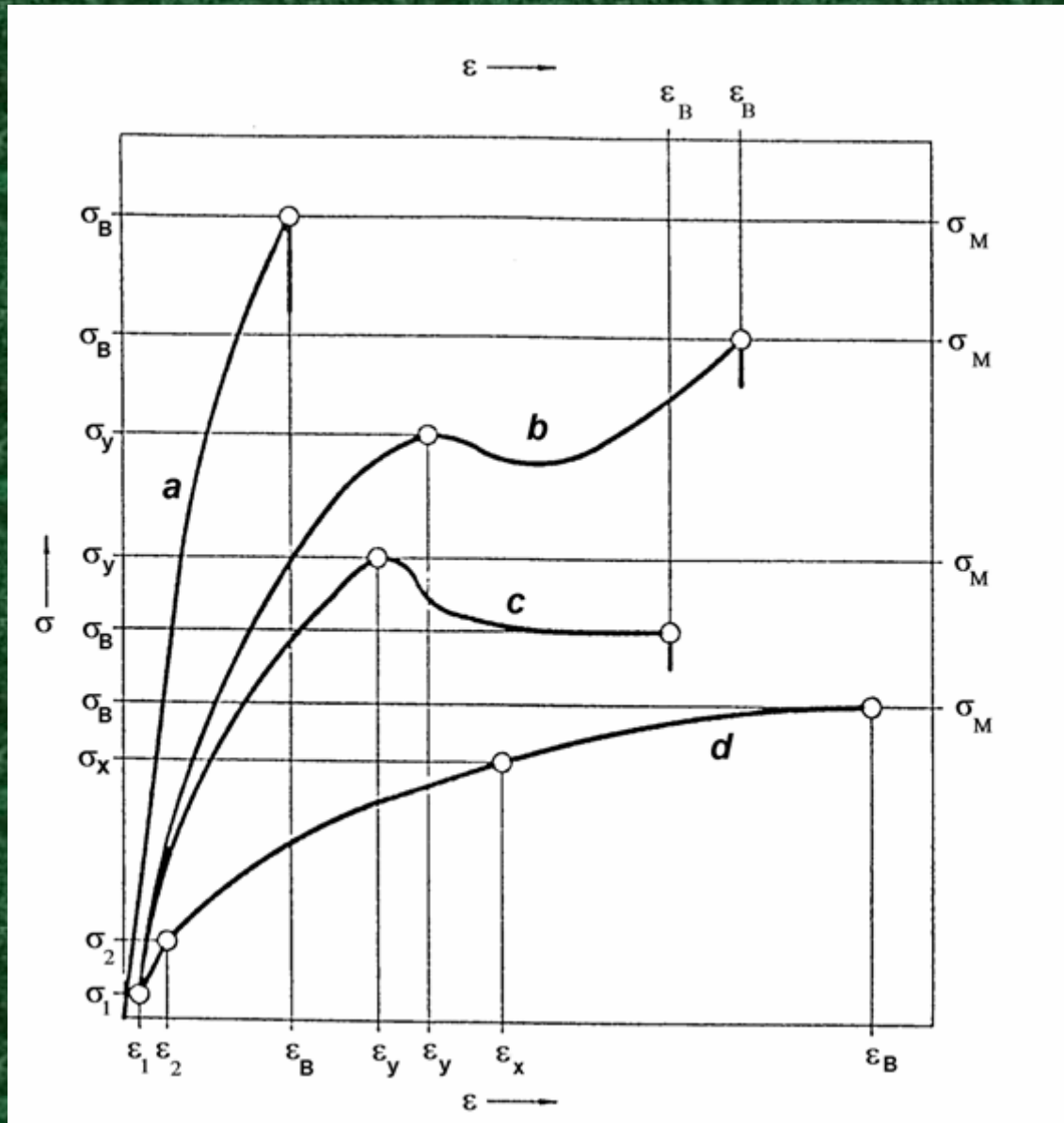
$$\frac{R_m}{R_e} \geq 1,4 \dots \dots \textit{velké} \_ \textit{zpevnění}$$

$$\frac{R_m}{R_e} \leq 1,2 \dots \dots \textit{malé} \_ \textit{zpevnění}$$

# Zkouška tahem - plasty



# Plasty – ČSN EN ISO 527 (640604) Zkouška tahem - plasty



$\sigma_M$  – mez \_ pevnosti

$\sigma_y$  – mez \_ kluzu

$\sigma_B$  – lomové \_ napětí

a - křehký

b - houževnatý s  $\sigma_y$

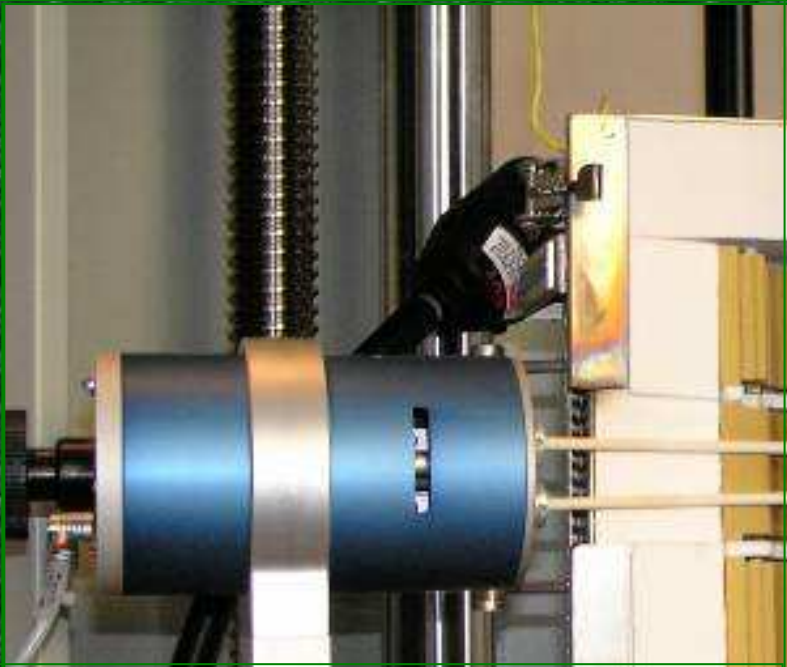
c - houževnatý s  $\sigma_y$

d - houževnatý bez  $\sigma_y$

## Zkouška tahem - keramiky

ČSN EN 658

- ❖ omezená obrobiteľnosť – jednoduché tvary
- ❖ vysoká krehkosť – predčasné lomy
- ❖ citlivosť na presnosť zatěžovacie osy
  
- ❖ prednosť – ohybové zkoušky



## Energetické charakteristiky

- energie kumulovaná při poškození

ČSN EN 658-1 (727510) (Cumulative damage energy)

Mechanické vlastnosti keramických kompozitů při pokojové teplotě – stanovení tahových vlastností

$$\Phi = \frac{1}{S_0 L_0} \int_0^{\Delta L_f} F d(\Delta L) \left[ \frac{kJ}{m^3} \right]$$

## Tahový diagram

(smluvní tahový diagram  $F - \Delta L(R - \varepsilon)$  )

- hodnocení kvality materiálu
- nákup – prodej (technické dodací podmínky EN)
- expertíza havárií
- pevnostní výpočty (únava)
- základní mechanické vlastnosti – v materiálových listech a databázích



# Plastická deformace a pevnost

- ✓ Anelasticita – vnitřní útlum
- ✓ Zkoušky základních mechanických charakteristik konstrukčních materiálů  
(kovy, plasty, keramiky, kompozity)
- ❖ Fyzikální podstata pevnosti
- ❖ Skutečný tahový diagram