

# Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

*redakce nakladatelství BEN – technická literatura*  
[redakce@ben.cz](mailto:redakce@ben.cz)



Vlastnosti konstrukčních materiálů rozhodují zásadním způsobem o bezpečnosti, spolehlivosti a účinnosti energetických zařízení. Pro každý účel a oblast použití existuje dnes možnost širokého výběru vhodných materiálů tuzemského nebo zahraničního původu. Optimální volba konstrukčního materiálu z technicko-ekonomického hlediska proto vyžaduje dokonalou znalost všech hlavních parametrů materiálu i situace na trhu.

Nejdůležitější konstrukční materiály v energetice lze rozdělit na kovy, keramické a izolační materiály.

## 2.1 Kritéria jakosti konstrukčních materiálů

Nejdůležitější vlastností konstrukčních materiálů v energetice je odolnost proti vnějším vlivům, tj. proti mechanickému namáhání, teplotě a chemickým vlivům. Pro konstrukční a provozní účely je nutno tyto vlastnosti kvantifikovat.

### 2.1.1 Pružnost

Působí-li na těleso vnější síly, těleso se deformuje. Pokud je deformace přímo úměrná napětí, které na těleso působí, mluvíme o namáhání pod mezí pružnosti. Deformace se řídí v tomto případě Hookovým zákonem

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad [1] \quad (2.1)$$

kde  $\varepsilon$  [1] je poměrná deformace (protažení nebo stlačení),  $\sigma$  [MPa] normální napětí a  $E$  [MPa] modul pružnosti v tahu. V případě smykového napětí platí

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad [1] \quad (2.2)$$

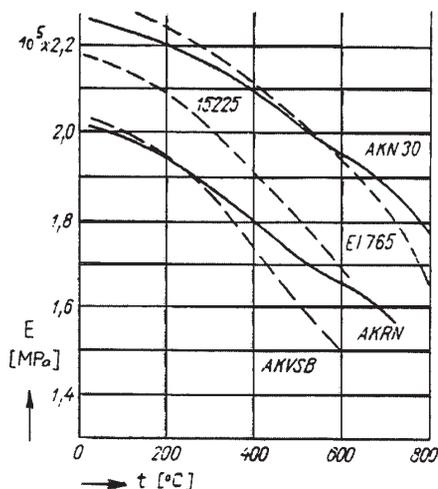
kde  $\gamma$  [1] je poměrný zkos,  $\tau$  [MPa] smykové napětí a  $G$  [MPa] modul pružnosti ve smyku. Při protažení tělesa se příčný průřez tělesa zužuje. Poměrné zúžení je rovněž přímo úměrné napětí. Poměr poměrného příčného zúžení ku poměrnému osovému prodloužení je stálý, pokud je deformace pružná (pokud platí Hookův zákon) a nazývá se Poissonovým číslem  $\mu$ . Poissonova konstanta  $m$  je definována jako převrácená hodnota Poissonova čísla

$$m = \frac{1}{\mu} \quad [1] \quad (2.3)$$

Pro izotropní těleso platí

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad [1] \quad (2.4)$$

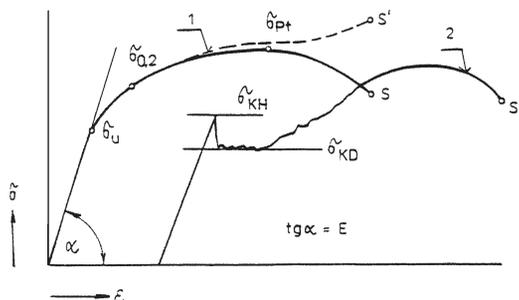
Modul pružnosti některých ocelí a slitin je v závislosti na teplotě uveden na obr. 2.1



**Obr. 2.1**

Modul pružnosti některých ocelí a slitin:  
 15225 – feritickoperlitická ocel;  
 AKVSB – austenitická chromniklová ocel;  
 AKRN – austenitická Cr-Ni ocel  
 vytvrditelná; E 1765 – slitina Cr-Ni  
 s přísadou W a Mo, vytvrditelná;  
 AKN 30 – slitina Cr-Ni-Co, vytvrditelná

Měřením nelze exaktně zjistit do jakého napětí platí Hookův zákon. Pro technickou praxi byla proto dohodnuta mez pružnosti jako napětí, které vyvolá při statickém zatížení trvalou deformaci 0,005 % původní délky zkušební tyče. Měření této veličiny je však náročné a proto se jako běžná hodnota charakterizující začátek trvalé deformace obvykle stanoví napětí, které způsobuje trvalou deformaci 0,2 % původní délky, což je tzv. mez 0,2 v tahu ( $\sigma_{0,2}$ ). U některých měkkkých uhlíkových ocelí se objevuje na začátku plastické deformace úsek rychlejšího prodlužování, který se snadno identifikuje a který se nazývá mezí kluzu ( $\sigma_K$ , mez kluzu v tahu  $\sigma_{Kt}$ ), viz obr. 2.2.



**Obr. 2.2**

Tlakový diagram měkké oceli  
 bez výrazné meze kluzu (1)  
 a s výraznou mezí kluzu (2)  
 $\sigma_{Pt}$  – mez pevnosti v tahu,  
 $tg \alpha = E$ , s – bod přetržení  
 zkušební tyče, S' – bod  
 přetržení s uvážením kontrakce tyče,  
 $\sigma_U$  – mez pružnosti,  $\sigma_{KH}$ ,  $\sigma_{KD}$  – mez  
 kluzu horní, popř. dolní

## 2.1.2 Plastická deformace

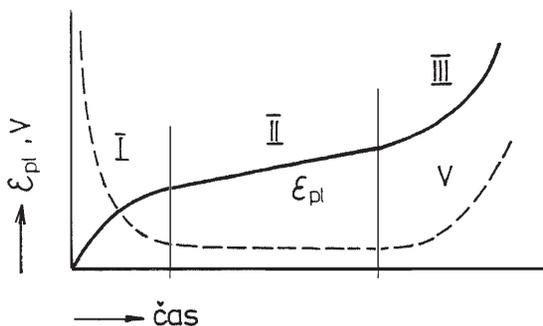
Zvyšuje-li se napětí nad mez pružnosti, nastává plastické přetvoření materiálu, což je charakteristická vlastnost kovů a slitin. Je způsobeno dislokacemi, tj. poruchami rozmístění atomů v krystalové mříži kovu. Při poklesu napětí na nulu zůstává v tomto případě trvalá deformace tělesa (na rozdíl od zatížení pod mezí pružnosti).

## 2.1.3 Pevnost

Při zvyšování napětí nad mezí pružnosti vyvolá plastická deformace vznik nových dislokací, které brání další deformaci – kov se zpevňuje. Zkušební tyč namáhána tahem se prodlužuje a zároveň i zužuje. Napětí vztažené na skutečný průřez tyče stále roste, až se tyč přetrhne. Protože se však v poslední fázi deformace průřez zužuje rychleji než probíhá zpevňování materiálu, nastává v tomto okamžiku pokles síly a tedy i napětí, vztaženého na počáteční průřez tyče. Napětí v okamžiku, kdy síla dosáhla maxima se nazývá pevnost materiálu ( $\sigma_P$ , pevnost v tahu  $\sigma_{Pl}$ ), viz obr. 2.2. U uhlíkových a nízkolegovaných ocelí je možno použít údaje krátkodobé tahové zkoušky k výpočtům pro provozní teploty přibližně do 400 °C.

## 2.1.4 Tečení

Při dostatečně dlouhém zatěžování kovové součásti za teplot vyšších než 400 °C se stává deformace součástí časově závislou. Deformace s časem roste a po jisté době může dojít k narušení materiálu, ačkoliv napětí v součásti může být značně menší než pevnost při dané teplotě. Tento jev se nazývá tečením materiálu (creep). Při tečení se rozlišují tři stadia charakterizovaná rychlostí tečení – obr. 2.3.



**Obr. 2.3** Růst trvalé deformace  $\varepsilon_{pl}$  a průběh rychlosti tečení  $V$  v čase

Tečení je stochastický proces a proto jej lze charakterizovat pouze statistickými veličinami a funkční závislosti mohou být jen přibližné. Jedním z nejstarších, nejjednodušších a nejčastěji používaných popisů tečení je vzorec Baileyho

$$\varepsilon = a \cdot \tau^n \quad [1] \quad (2.5)$$

kde je  $\varepsilon$  [1] plastická deformace,

$a, n$  konstanty,

$\tau$  [h] čas.

Bína a Pech navrhli přesnější vztah

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_t} \cdot \exp(a \tau^n) \quad [1] \quad (2.6)$$

kde  $E_t$  je modul pružnosti při teplotě  $t$ , napětí  $\sigma$  je nutno počítat podle některé teorie složené napjatosti.

Při zkouškách tečení se zjišťuje křivka tečení, což je závislost poměrné deformace na čase, napětí a teplotě. Napětí, které za zvolenou dobu při dané teplotě  $T$  způsobí přetržení zkušební tyče se označuje jako mez pevnosti při tečení ( $\sigma_{Tt}$ ). Pokud nelze vést zkoušky při vysokých teplotách až do přetržení, stanovuje se tzv. dlouhodobá mez tečení ( $\sigma_{Tt}$ ), což je napětí, při němž dosáhne stále se zvětšující trvalá deformace při dané konstantní teplotě  $T$  za určitou dobu určité stanovené velikosti (např. 1 % za  $10^5$  hod.). Z časových důvodů nebývá většinou možné prověřit experimentálně hodnoty tečení v celém časovém rozsahu až do lomu, neboť u energetických zařízení se počítá s životností řádově  $10^5$  hodin. Proto byla zavedena tzv. krátkodobá zkouška tečení (ČSN 1237–1943). Při ní se zjišťuje rychlost tečení v časovém intervalu mezi 25. a 35. hodinou. Napětí, při kterém dosáhne střední rychlost tečení v této době hodnotu  $1 \cdot 10^{-5}$  %/h se nazývá krátkodobou mezí tečení ( $\sigma_{Tt35}$ ). Extrapolování výsledků krátkodobých zkoušek na delší doby je však značně problematické. Proto se od nich upouští.

Dlouhodobé zkoušky trvají obvykle několik tisíc hodin ( $10^4$  i více hodin), takže i tyto výsledky je nutno extrapolovat. I v tomto případě je však přesnost extrapolace nízká. K rychlému zhodnocení se proto stále častěji používají parametrické metody vyhodnocení, z nichž nejrozšířenější je metoda Larsonova-Millerova. Princip metody spočívá v tom, že zvýšenou teplotou lze průběh strukturních jevů v kovu urychlit.

### 2.1.5 Relaxace napětí

Při zatížení strojní součásti za tepla může nastat případ, kdy se rozměry součásti nemohou podstatně měnit, např. u šroubu, který je napjat mezi tuhými přírubami. Šroub je pružně deformován a jestliže jsou splněny podmínky tečení, vzniká jeho plastická deformace  $\varepsilon_{pl}$ , přičemž se zmenšuje elastická deformace  $\varepsilon_{el}$ , neboť celková deforma-

ce  $\varepsilon_0$  musí zůstat konstantní. Tím postupně klesá předpětí, které je úměrné  $\varepsilon_{el}$ . Tento jev se nazývá relaxací napětí. Napětí v čase  $\tau$  je při relaxaci dáno vztahem

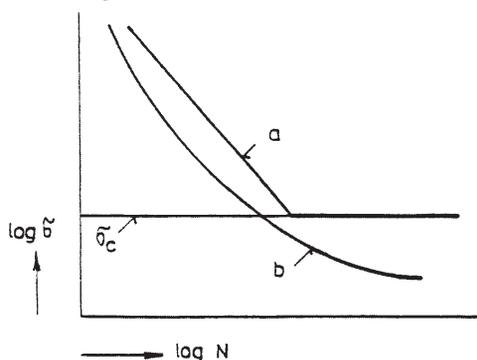
$$\sigma_\tau = E \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_{pl}) \quad [\text{MPa}] \quad (2.7)$$

Vzhledem ke složité závislosti relaxace na čase, napětí a teplotě se definuje konvenční mez relaxace: je to napětí, které zůstává po určité době za dané teploty a při daném počátečním napětí zachováno. Označuje se  $\sigma_R$  a obvykle se vztahuje k době  $1 \cdot 10^4$  h.

## 2.1.6 Únavové vlastnosti

Většina strojních součástí je namáhána kombinací statického a časově proměnného napětí. Proměnné napětí může mít pravidelný harmonický charakter nebo je v čase nepravidelné. Podle podílu statické a proměnné složky se rozeznává napětí střídavé (statická složka je malá nebo nulová a proměnné napětí se mění mezi tahem a tlakem) a napětí pulzující (statická složka je větší než amplituda proměnného napětí). Podle kmitočtu proměnného napětí se rozeznává zatížení nízkocyklové a vysokocyklové (počet cyklů je větší než  $5 \cdot 10^4$ ).

Při vysokocyklovém zatížení klesá napětí do lomu se zvětšujícím se počtem cyklů, jak je zřejmé z Wöhlerova diagramu – obr. 2.4.



**Obr. 2.4** Wöhlerův diagram pro oceli (a) a čisté kovy (b),  $N$  – počet cyklů

Je-li součást zatěžována cyklicky, je amplituda napětí způsobujícího lom nižší než statická mez pevnosti, nebo dokonce nižší než statická mez kluzu. U ocelí nedochází k lomu při poklesu napětí na hodnotu  $\sigma_c$  ani při velmi vysokém počtu cyklů. Toto napětí se proto označuje jako skutečná mez únavy. U čistých kovů nebo u ocelí za velmi vysokých teplot výrazná mez únavy neexistuje.

Působí-li na součást zároveň s cyklickým napětím i napětí statické (předpětí  $\sigma_m$ ), dostáváme pro různá předpětí různé Wöhlerovy křivky. Závislost meze únavy  $\sigma_c$  na předpětí  $\sigma_m$  se znázorňuje Haighovým diagramem – obr. 2.5.