

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



ÚNAVA MATERIÁLU

Mez únavy hladkých těles, faktory, ovlivňující mez únavy

Ing. Martin Fusek, Ph.D.

Dr. Ing. Adámková Ludmila

Ostrava 2013

© Ing. Martin Fusek, Ph.D., Dr. Ing. Adámková Ludmila

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3024-7



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

8	MEZ ÚNAVY HLADKÝCH TĚLES, FAKTORY, OVLIVŇUJÍCÍ MEZ ÚNAVY....	3
8.1	Mez únavy hladkých těles	4
8.2	Faktory, ovlivňující mez únavy	4
8.2.1	Vliv teploty na únavu materiálu.....	4
8.2.2	Vliv velikosti součástí	5
8.2.3	Vliv gradientu napětí.....	5
8.2.4	Vliv jakosti povrchu	7
8.3	Řešené příklady	8
8.4	Příklady k procvičení.....	9
8.5	Literatura.....	10



8 MEZ ÚNAVY HLADKÝCH TĚLES, FAKTORY, OVLIVŇUJÍCÍ MEZ ÚNAVY



OBSAH KAPITOLY:

Mez únavy hladkých těles.

Vliv teploty na únavu materiálu.

Vliv velikosti součástí.

Vliv gradientu napětí.

Vliv jakosti povrchu.



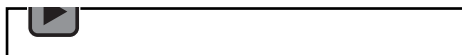
MOTIVACE:

Mez únavy hladkého tělesa není obecně materiálovou konstantou, ale je závislá na celé řadě faktorů. Jednotlivé faktory jsou náplní této přednášky.

V technické praxi jsou často k dispozici meze únavy hladkého leštěného vzorku určitého průměru. Na uvedených příkladech je vysvětlen postup stanovení meze únavy strojních součástí konkrétních rozměrů.



Audio 8.1 Motivace



CÍL:

Mez únavy hladkých těles. Uveďte hlavní vlivy na mez únavy hladkých těles.



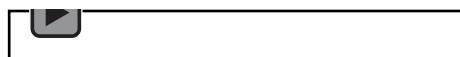
8.1 MEZ ÚNAVY HLADKÝCH TĚLES

Za hladké těleso považuje součást bez koncentrátorů napětí. Zpočátku mez únavy hladkých těles byla považována za veličinu charakteristickou pro daný materiál, podobně jako mez pevnosti při statické zkoušce tahem. Pozdější výzkumy ale ukázaly, že mez únavy hladkého tělesa (bez koncentrátorů napětí) je závislá na celé řadě faktorů, k nimž zejména patří velikost tělesa, jakost povrchu, nesymetrie zatěžovacího cyklu, vliv víceosé napjatosti.

Mez únavy se dá určit jednak experimentálně, rovněž ale bylo prokázáno, že mez únavy hladkých těles je funkcí konvenční pevnosti R_m .



Audio 8.2 Mez únavy



Pro konstrukční oceli s mezí pevnosti $R_m = (500 \div 1500) \text{MPa}$ platí následující vztahy

$$\text{Tah-tlak } \sigma_c = 0.36R_m + 13$$

$$\text{Míjivý tah } \sigma_{hc} = 0.59R_m + 38$$

$$\text{Plochý ohyb } \sigma_{o,c} = 0.29R_m + 111$$

$$\text{Míjivý ohyb } \sigma_{o,hc} = 0.4R_m + 317$$

$$\text{Krut } \tau_c = 0.21R_m + 49$$

$$\text{Míjivý krut } \tau_{hc} = 0.1R_m + 485$$

$$\text{Ohyb za rotace } \sigma_{oR,c} = 0.36R_m + 44.$$

Informativní hodnoty meze únavy šedé litiny jsou uvedeny v tabulce 1

	Pevnost v tahu R_m [MPa]	160	220	320	370
Mez únavy	v tahu- tlaku	46	50	120	140
[MPa]	ve střídavém ohybu	63	85	140	150
	ve střídavém krutu	77	85	120	150

Tabulka 1

V kapitole 7 bylo uvedeno, že mez únavy hliníkových slitin není konstantní, ale s počtem cyklů nad 10^7 klesá. Mez únavy tvářených slitin hliníku můžeme podle Heywooda vypočítat ze vztahu

$$\sigma_c = R_m \frac{1 + \frac{3.1n^4}{10^3 + 6.5R_m}}{1 + 3.1 \times 10^{-3}n^4} \quad (8.1)$$

kde

$$n = \log N \quad (8.2)$$

a N je počet cyklů do lomu, pro který mez únavy počítáme.

8.2 FAKTORY, OVLIVŇUJÍCÍ MEZ ÚNAVY

Jak už bylo výše poznamenáno, mez únavy hladkého tělesa (bez koncentrátorů) napětí je závislá na celé řadě faktorů, k nimž zejména patří teplotní vlivy, velikost tělesa, jakost povrchu, nesymetrie zatěžovacího cyklu, vliv víceosé napjatosti.

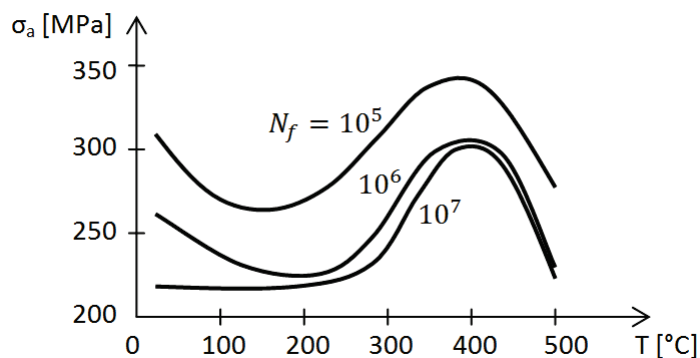
8.2.1 Vliv teploty na únavu materiálu

Oceli mají obecně při nižších teplotách vyšší mez únavy. Při nižších teplotách dochází ale rovněž k poklesu lomové houževnatosti.



Audio 8.3 Vliv teploty





Obrázek 1

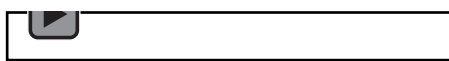
Závislost meze únavy i životnosti na teplotě pro vzorky z válcované oceli ($R_e = 290\text{MPa}$, $R_m = 450\text{MPa}$) je znázorněna na obr.1. Mez únavy i životnost rostou s poklesem teploty pod normální teplotu. Za mírně zvýšené teploty u ocelí klesají, dosahují lokálního minima v rozmezí teplot 100-200°C a pak zase rostou až k maximumu kolem teploty 350-400°C. Při teplotách nad 400°C začnou klesat. Při teplotách vyšších než 400°C dochází zároveň k tečení materiálu (creep). Podíl poškození materiálu způsobeného creepem závisí především na poměru provozní teploty materiálu k teplotě tavení materiálu. Pokud je tento podíl vysoký, dochází ke změně charakteru lomu z transkrystalického na interkrystalický.

8.2.2 Vliv velikosti součásti

Mez únavy s rostoucím rozměrem vzorku poněkud klesá, což je dáno odlišnostmi povrchových vrstev a jádra průřezu, která je zpravidla u větších vzorků horší.



Audio 8.4 Vliv velikosti součásti



Podle Němce a Puchnera je možno vliv velikosti vyjádřit následovně

$$v = 1 - \sqrt{0.02 \ln \frac{D}{d}} \quad (8.3)$$

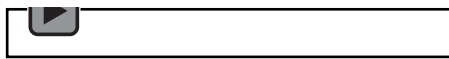
kde d je rozměr menšího vzorku a D rozměr většího.

8.2.3 Vliv gradientu napětí

Na základě experimentů je prokázáno, že mez únavy v ohybu a krutu u vzorků malých rozměrů je vždy větší než mez únavy v tahu-tlaku. Tento jev je způsoben nerovnoměrným rozložením napětí, tzv. gradientem napětí.



Audio 8.5 Vliv gradientu napětí



Je-li ohybové napětí v krajním vlákně vzorku

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o d}{2J_y} \quad (8.4)$$

je poměrný gradient napětí

$$\chi_\sigma = \frac{1}{\sigma_o} \frac{d\sigma}{dz} = \frac{1}{\sigma_o} \frac{d}{dz} \left| \frac{M_o z}{J_y} \right| = \frac{1}{\sigma_o} \frac{2\sigma_o}{d} = \frac{2}{d} \quad (8.5)$$

Gradient napětí je tedy u malých vzorků velký a naopak (pro $d \rightarrow \infty$ se gradient napětí blíží k nule). Na základě zkoušek předpokládáme, že u velkých průměrů se gradient napětí již



neuplatňuje (zhruba pro $D \geq 50\text{mm}$). V případě tahového (tlakového) namáhání je gradient napětí nulový.

Výpočet součinitele gradientu napětí navrhl například Heywood.

Součinitel gradientu napětí v_g je roven

$$v_g = 1 + \sqrt{c\chi_\sigma} = 1 + \sqrt{\frac{2c}{d}} \quad (8.6)$$

Kde c je materiálová konstanta, závislá na pevnosti oceli (tab.2).

Materiál	R_e [MPa]	R_m [MPa]	c [mm]
Měkká ocel	150	-	0.1
	200	-	0.05
	400	-	0.022
Zušlechtná ocel	400	-	0.022
	500	-	0.0078
	900	-	0.0014
Austenitická ocel	200	-	0.215
	400	-	0.1
Ocel na odlitky	-	400	0.250
	-	600	0.215
Šedá litina	-	180	0.38
	-	300	0.25
Slitiny Al, Mg	100	-	0.027
	300	-	0.008
Dural	300	-	0.074
	400	-	0.046
Mosaz	100	-	0.103
	250	-	0.021

Tabulka 2

Další způsob výpočtu gradientu napětí navrhl Němec [3], který definuje gradient napětí vztahem

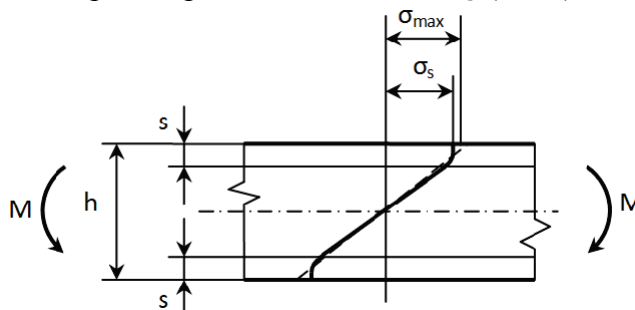
$$v_g = 1 + \sqrt{c\chi_\sigma} = 1 + \sqrt{\frac{2c}{d}} \quad (8.7)$$

kde

σ_{max} je maximální (elastické napětí) v povrchové vrstvě

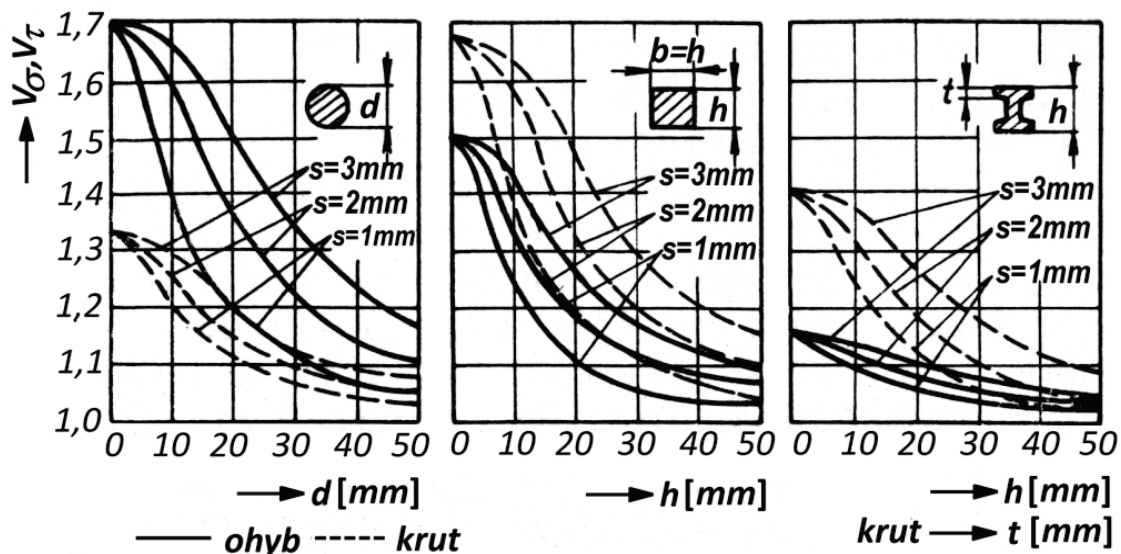
a

σ_s je skutečné napětí v povrchové vrstvě. Změna mechanických vlastností v povrchových vrstvách způsobuje pokles napětí na povrchu na hodnotu σ_s (obr.2).



Obrázek 2

Hodnoty součinitelů gradientů napětí jsou pro různé tloušťky povrchových vrstev uvedeny v obr.3.



Obrázek 3

Celkový součinitel velikosti součástí, namáhané střídavým ohybem v_σ (krutem v_τ), je tedy závislý na součiniteli gradientu napětí v_g a součiniteli velikosti, tedy

$$v_\sigma = f(v_g, v) \quad (8.8)$$

a

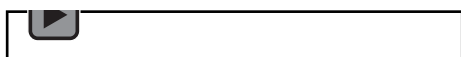
$$v_\tau = f(v_g, v). \quad (8.9)$$

8.2.4 Vliv jakosti povrchu

Protože k nukleaci trhlin dochází zpravidla v povrchové vrstvě, je mez únavy ovlivňována jakostí povrchu. Při únavových zkouškách bylo dokázáno, že nejvyšší mez únavy vykazují tyče s dokonale hladkým (jemně leštěným povrchem). Každý jiný způsob opracování má za následek snížení meze únavy.

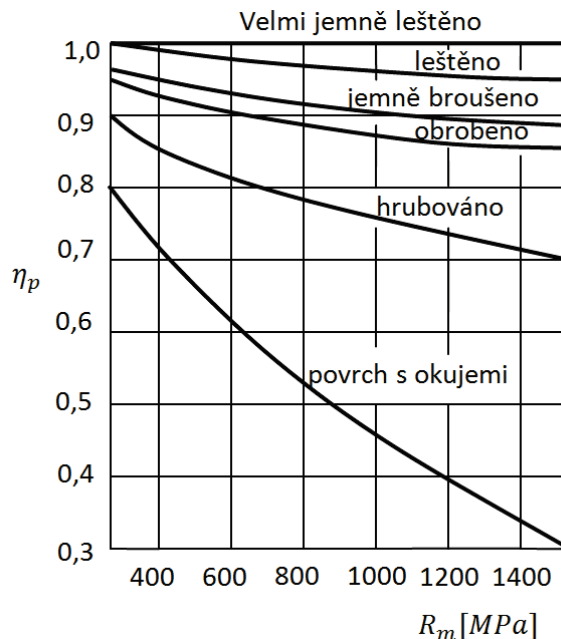


Audio 8.6 Vliv jakosti povrchu



Všechny následky obrábění, ke kterým patří např. rýhy, vrypy, trhlinky, působí jako ostré vruby a jsou často východiskem únavových lomů. Vliv jakosti povrchu je ve výpočtech zohledněn součinitelem jakosti povrchu η_p , který je definován jako podíl meze únavy součástí s daným povrchem k mezi únavy součástí s povrchem leštěným. Studium jakosti povrchu v závislosti na mezi pevnosti R_m se zabývali Siebel a Mailänder. Závislost součinitele jakosti povrchu η_p na mezi pevnosti R_m je znázorněna na obr.4.





Obrázek 1

Vhodnými technologickými úpravami povrchu lze významně zvýšit mez únavy součásti. K těmto úpravám patří zejména jednak úpravy mechanické (válečkování, kuličkování, prokování povrchových vrstev součástí) a rovněž tepelná zpracování (povrchové kalení, cementování, nitridování). V důsledku těchto procesů dochází v povrchových vrstvách ke vzniku tlakového vlastního napětí I.druhu, které se za provozu superponuje s tahovým napětím, čímž výsledné tahové napětí rozhodující o únavě bude menší.

Účinek galvanického pokovování není dosud jednoznačně objasněn, ale má spíše nepříznivý vliv.

Z vlivů snižujících mez únavy je nutno uvést zvláště korosivní prostředí, které ovlivňuje únavový proces chemickými reakcemi jak při iniciaci trhlin, tak i při jejich šíření.

Při namáhání krutem je součinitel jakosti povrchu roven

$$\eta_{pk} = \frac{1+\eta_p}{2} \quad (8.10)$$

Mez únavy hladké části (bez vrubu) v tahu- tlaku nebo ohybu je pak definována následovně

$$\sigma_c^x = \sigma_c v_\sigma \eta_p \quad (8.11)$$

a v krutu

$$\tau_c^x = \tau_c v_\tau \eta_{pk} \quad (8.12)$$

K zapamatování:

- Mez únavy materiálu v případě ocelí se dá určit přibližně z meze pevnosti.
- Vliv velikosti součástí – mez únavy s rostoucím rozměrem klesá.
- Vliv gradientu napětí – mez únavy v ohybu větší než mez únavy v tahu –tlaku.
- Vliv jakosti povrchu – nejvyšší mez únavy leštěné součástí – každý jiný způsob opracování vede ke snížení meze únavy.

8.3 ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

Příklad 1

Vypočítejte mez únavy hladkého hřídele, namáhaného

a) Na ohyb

b) Na tah

je-li jeho průměr:



1. 5 mm,
2. 20 mm.

Dáno: Mez únavy leštěného vzorku v tahu $\sigma_{cT(5)} = 140 \text{ MPa}$, mez kluzu $R_e = 600 \text{ MPa}$, povrch broušený.

Řešení:

1a) Mez únavy hladkého hřídele $\varnothing = 5 \text{ mm}$, namáhaného na ohyb

Součinitel jakosti povrchu pro $R_e = 600 \text{ MPa}$ a broušený povrch určíme z obr.4 (přednáška 8). Je tedy

$$\eta_p = 0.9$$

V případě namáhání ohybem je nutno určit velikost součinitele gradientu napětí v_g .

Z obr .3 (přednáška 8) je

$$v_g(5) = 1.6$$

a tedy

$$\sigma_{co(5)}^x = \sigma_{cT(5)} v_g(5) \eta_p = 140 \times 1.6 \times 0.9 = 201.6 \text{ MPa}$$

1b) Mez únavy hladkého hřídele $\varnothing = 5 \text{ mm}$, namáhaného na tah.

V tomto případě je nutno uvažovat pouze vliv součinitele jakosti povrchu η_p .

Je tedy

$$\sigma_{cT(5)}^x = \sigma_{cT(5)} \eta_p = 140 \times 0.9 = 126 \text{ MPa}.$$

2a) Mez únavy hladkého hřídele $\varnothing = 20 \text{ mm}$, namáhaného na ohyb

Součinitel gradientu napětí $v_g(20)$ je roven

$$v_g(20) = 1.2.$$

Dále je nutno uvažovat součinitel velikosti součásti v

$$v = 1 - \sqrt{0.02 \ln \frac{D}{d}} = 1 - \sqrt{0.02 \ln \frac{20}{4}} = 0.833$$

a po dosazení

$$\sigma_{co(20)}^x = \sigma_{cT(5)} v_g(20) v \eta_p = 140 \times 1.2 \times 0.833 \times 0.9 = 126 \text{ MPa}$$

2b) Mez únavy hladkého hřídele $\varnothing = 20 \text{ mm}$, namáhaného na tah.

$$\sigma_{cT(20)}^x = \sigma_{cT(5)} v \eta_p = 140 \times 0.833 \times 0.9 = 105 \text{ MPa}$$

8.4 PŘÍKLADY K PROCVIČENÍ

Příklad 1

Vypočtete mez únavy hladkého hřídele $\varnothing = 20 \text{ mm}$, namáhaného na ohyb, jestliže je dáno:

Mez únavy leštěného vzorku v ohybu $\sigma_{co(5)} = 230 \text{ MPa}$, mez kluzu $R_e = 600 \text{ MPa}$, povrch broušený.

Výsledek: $\sigma_{co(20)}^x = 185 \text{ MPa}$



8.5 LITERATURA

- [1] Kučera, J. *Úvod do mechaniky lomu. Únava materiálu*. VŠB-TU Ostrava, 1994. 80s. Skriptum. ISBN 80-7078-244-7.
- [2] Tore Dahlberg, Anders Ekberg. *Failure Fracture Fatigue. An Introduction*. Sweden 2009. ISBN 978-91-44-02096-9. 360 p.
- [3] Hoschl, C. *Pružnost a pevnost ve strojnictví*. SNTL Praha 1971. 376 s.
- [4] Dowling, N.E. *Mechanical behavior of materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and fatigue*. Third edition. Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 0-13-186312-6.
- [5] Vlk, M., Florian, Z. *Mezní stavy a spolehlivost*. Elektronický učební text. www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf

