

# 6KT

## KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ - PŘEVODY

*Výpočet bezpečnosti v ohybu*

**David Rebenda**

[David.Rebenda@vut.cz](mailto:David.Rebenda@vut.cz)

A2/401

Ústav konstruování

Fakulta strojního inženýrství

VUT v Brně

5. cvičení



# Náplň pátého cvičení

Časový harmonogram	
T.	Část výpočtu
3.	Silové poměry v ozubení
	Volba materiálu kol a návrh tvrdosti na boku zubu
	Stanovení součinitelů silových poměrů v ozubení
4.	Pevnostní kontrola ozubení v dotyku
5.	<b>Pevnostní kontrola ozubení v ohybu</b>

Silové poměry v ozubení



Volba materiálu a návrh tvrdosti zubů



Součinitelé silových poměrů



Výpočet únosnosti boků zubů v dotyku



Součinitelé pro výpočet únosnosti zubů v ohybu

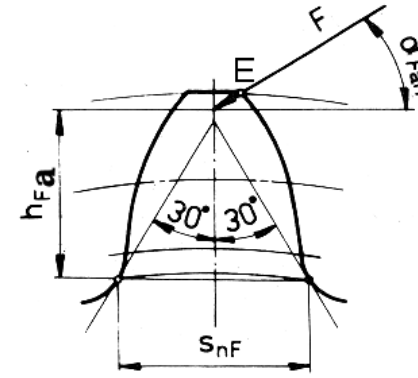


Bezpečnost v ohybu

Kontrolní list		
T.	Parametr	
5.	Součinitel tvaru zubu (centrální kolo)	$Y_{Fa1}$
	Součinitel tvaru zubu (satelit)	$Y_{Fa2}$
	Součinitel koncentrace napětí (centrální kolo)	$Y_{Sa1}$
	Součinitel koncentrace napětí (satelit)	$Y_{Sa2}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (centrální kolo)	$Y_{NT1}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (satelit)	$Y_{NT2}$
	Poměrný součinitel vrubové citlivosti	$Y_{\delta relT}$
	Poměrný součinitel drsnosti	$Y_{RrelT}$
	Mez únavy v ohybu referenčního ozubeného kola pro satelit	$\sigma_{FE2}$
	Bezpečnost v ohybu (centrální kolo)	$S_{F1}$
Bezpečnost v ohybu (satelit)	$S_{F2}$	



# Součinitelé pro výpočet únosnosti zubů v ohybu



Kontrolní list	
T.	Parametr
5.	Součinitel tvaru zubu (centrální kolo)
	Součinitel tvaru zubu (satelit)
	Součinitel koncentrace napětí (centrální kolo)
	Součinitel koncentrace napětí (satelit)
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (centrální kolo)
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (satelit)
	Poměrný součinitel vrubové citlivosti
	Poměrný součinitel drsnosti
	Mez únavy v ohybu referenčního ozubeného kola pro satelit
	Bezpečnost v ohybu (centrální kolo)
	Bezpečnost v ohybu (satelit)

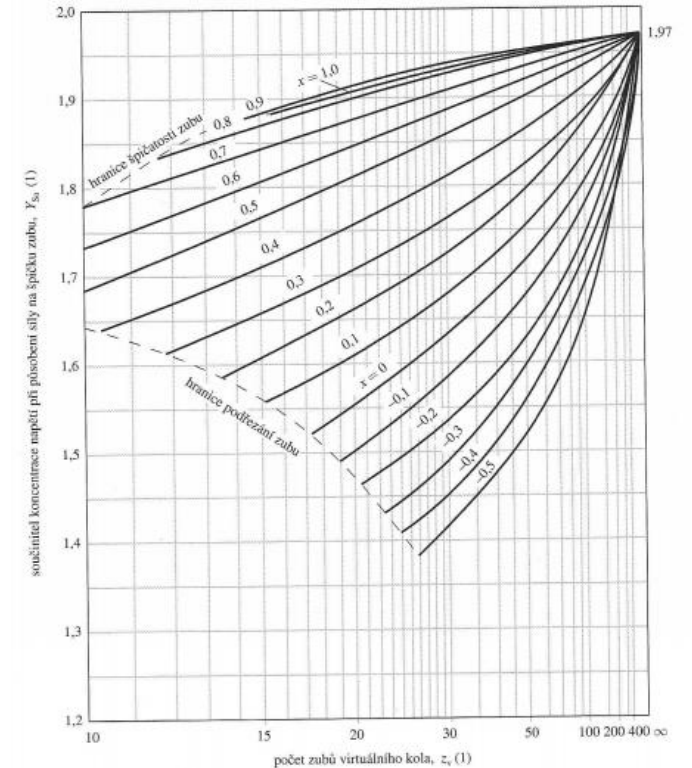
## Součinitel tvaru zubu při působení síly na špičku zubu

- Vliv tvaru přechodové křivky zubu na napětí v ohybu v patě zubu
- Dle počtů zubů virtuálního kola a jednotkového posunutí  $x$

$$z_{v1} = \frac{z_1}{\cos^3 \beta_{12}}$$

## Součinitel koncentrace napětí při působení síly na špičku zubu

- Vliv koncentrace napětí v ohybu v patě zubu



Nominální napětí v ohybu

$$\sigma_{F01} = \frac{F_{t1}}{b m_n} Y_{Fa1} Y_{Sa1} Y_{\epsilon} Y_{\beta}$$



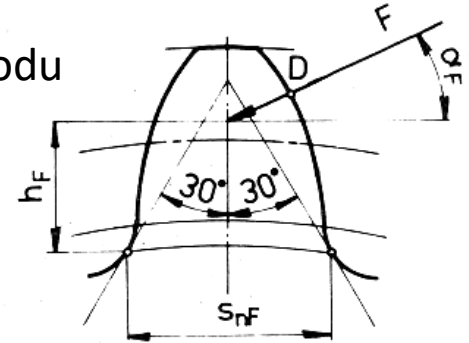
# Součinitelé pro výpočet únosnosti zubů v ohybu

Kontrolní list		
T.	Parametr	
5.	Součinitel tvaru zubu (centrální kolo)	$Y_{Fa1}$
	Součinitel tvaru zubu (satelit)	$Y_{Fa2}$
	Součinitel koncentrace napětí (centrální kolo)	$Y_{Sa1}$
	Součinitel koncentrace napětí (satelit)	$Y_{Sa2}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (centrální kolo)	$Y_{NT1}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (satelit)	$Y_{NT2}$
	Poměrný součinitel vrubové citlivosti	$Y_{\delta relT}$
	Poměrný součinitel drsnosti	$Y_{RrelT}$
	Mez únavy v ohybu referenčního ozubeného kola pro satelit	$\sigma_{FE2}$
	Bezpečnost v ohybu (centrální kolo)	$S_{F1}$
	Bezpečnost v ohybu (satelit)	$S_{F2}$

## Součinitel vlivu záběru profilu (str. 827)

- Slouží k převodu působiště síly ze špičky zubu do vnějšího bodu jednopárového záběru

$$Y_{\epsilon} = 0,25 + \frac{0,75}{\epsilon_{\alpha}} \cos^2 \beta_b$$



## Součinitel sklonu zubu (str. 827)

$$Y_{\beta} = 1 - \epsilon_{\beta} \frac{\beta}{120^{\circ}}$$

- Pro přímé zuby platí:  $\beta = 0$

## Nominální napětí v ohybu

$$\sigma_{F01} = \frac{F_{t1}}{b m_n} Y_{Fa1} Y_{Sa1} Y_{\epsilon} Y_{\beta}$$



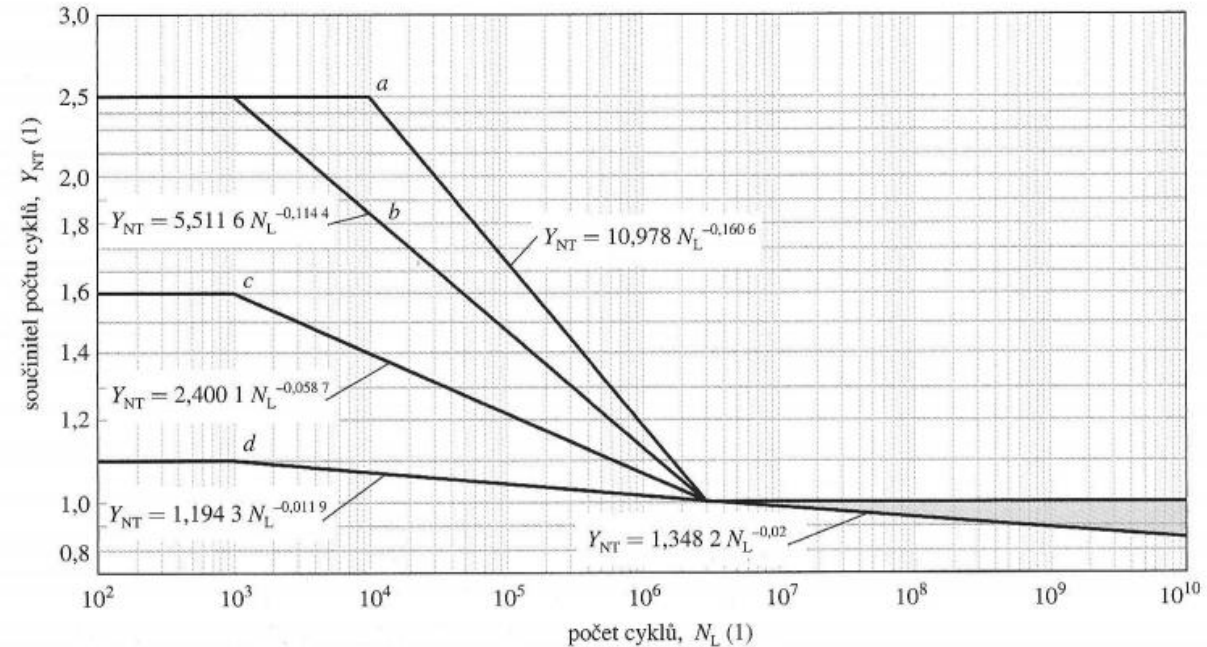
# Součinitelé pro výpočet únosnosti zubů v ohybu

Kontrolní list		
T.	Parametr	
5.	Součinitel tvaru zubu (centrální kolo)	$Y_{Fa1}$
	Součinitel tvaru zubu (satelit)	$Y_{Fa2}$
	Součinitel koncentrace napětí (centrální kolo)	$Y_{Sa1}$
	Součinitel koncentrace napětí (satelit)	$Y_{Sa2}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (centrální kolo)	$Y_{NT1}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (satelit)	$Y_{NT2}$
	Poměrný součinitel vrubové citlivosti	$Y_{\delta relT}$
	Poměrný součinitel drsnosti	$Y_{RrelT}$
	Mez únavy v ohybu referenčního ozubeného kola pro satelit	$\sigma_{FE2}$
	Bezpečnost v ohybu (centrální kolo)	$S_{F1}$
	Bezpečnost v ohybu (satelit)	$S_{F2}$

*Součinitel počtu cyklů pro pastorek a kolo* (str. 828) *Graf 14-23 (str. 828)*

- Obdoba Wöhlerovy křivky pro ozubená kola
- Mez únavy v ohybu (trvalá pevnost) je určena pro  $3 \cdot 10^6$  cyklů, čemuž odpovídá  $Y_{NT} \approx 1$  (idealizované).
- Pro jiný požadovaný počet cyklů je třeba součinitel  $Y_{NT}$  určit a korigovat mez únavy.

*Graf 14-23 (str. 828) křivka b*



*Bezpečnost v ohybu*

5. cvičení

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{FE1} Y_{NT1}}{\sigma_{F1}} Y_{\delta relT} Y_{RrelT} Y_X$$



# Součinitelé pro výpočet únosnosti zubů v ohybu

Kontrolní list		
T.	Parametr	
5.	Součinitel tvaru zubu (centrální kolo)	$Y_{Fa1}$
	Součinitel tvaru zubu (satelit)	$Y_{Fa2}$
	Součinitel koncentrace napětí (centrální kolo)	$Y_{Sa1}$
	Součinitel koncentrace napětí (satelit)	$Y_{Sa2}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (centrální kolo)	$Y_{NT1}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (satelit)	$Y_{NT2}$
	Poměrný součinitel vrubové citlivosti	$Y_{\delta relT}$
	Poměrný součinitel drsnosti	$Y_{RrelT}$
	Mez únavy v ohybu referenčního ozubeného kola pro satelit	$\sigma_{FE2}$
	Bezpečnost v ohybu (centrální kolo)	$S_{F1}$
	Bezpečnost v ohybu (satelit)	$S_{F2}$

## *Poměrný součinitel vrubové citlivosti* (str. 829)

- Dán poměrem vrubové citlivosti posuzovaného ozubeného kola a referenčního ozubeného kola.
- Závisí na materiálu a gradientu napětí v patě zubu.

$$Y_{Sa} > 1,8 \text{ je bezpečné uvažovat } Y_{\delta relT} = 1,$$

$$Y_{Sa} < 1,8 \text{ je bezpečné uvažovat } Y_{\delta relT} = 0,8.$$

## *Součinitel drsnosti v oblasti patního přechodu zubu* (str. 829)

- Vliv materiálu a drsnosti povrchu v oblasti patního přechodu na napětí v ohybu.

*Volit dle střední výšky prvků profilu  $R_{zISO}$  ( $R_{zISO} = 6R_a$ )*

$$\text{pro } R_{zISO} \leq 16 \mu\text{m je } Y_{RrelT} = 1,$$

$$\text{pro } R_{zISO} > 16 \mu\text{m je } Y_{RrelT} = 0,9.$$

## *Součinitel velikosti* (str. 830)

$$Y_X = 1 \text{ Je-li modul } m \leq 5$$

## *Bezpečnost v ohybu*

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{FE1} Y_{NT1}}{\sigma_{F1}} Y_{\delta relT} Y_{RrelT} Y_X$$



# Výpočet únosnosti zubů v ohybu

## Únosnost zubů v ohybu

- Schopnost zubů zajistit bezpečnost proti únavovému lomu (šíření trhliny) v oblasti patního přechodu zubu

## Výpočet bezpečnosti v ohybu dle ISO

Příklad 14-4, str. 845, přehled rovnic 836

- Napětí v ohybu v patě zubu se určuje zvlášť pro pastorek i kolo, nesmí překročit přípustné napětí

## Nominální napětí v ohybu

- Dokonale přesné ozubení (teoretické)
- Pouze statické nominální zatížení

$$\sigma_{F01} = \frac{F_{t1}}{bm_n} Y_{Fa1} Y_{Sa1} Y_\varepsilon Y_\beta$$

$$\sigma_{F02} = \frac{F_{t2}}{bm_n} Y_{Fa2} Y_{Sa2} Y_\varepsilon Y_\beta$$

b (menší z šířek  $b_1, b_2$ )

## Napětí v ohybu v patě zubu

- Zahrnutí dynamických silových poměrů

$$\sigma_{F1} = \sigma_{F01} K_A K_V K_{F\beta} K_{F\alpha}$$

$$\sigma_{F2} = \sigma_{F02} K_A K_V K_{F\beta} K_{F\alpha}$$



# Výpočet únosnosti zubů v ohybu

Kontrolní list		
T.	Parametr	
5.	Součinitel tvaru zubu (centrální kolo)	$Y_{Fa1}$
	Součinitel tvaru zubu (satelit)	$Y_{Fa2}$
	Součinitel koncentrace napětí (centrální kolo)	$Y_{Sa1}$
	Součinitel koncentrace napětí (satelit)	$Y_{Sa2}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (centrální kolo)	$Y_{NT1}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (satelit)	$Y_{NT2}$
	Poměrný součinitel vrubové citlivosti	$Y_{\delta relT}$
	Poměrný součinitel drsnosti	$Y_{RrelT}$
	Mez únavy v ohybu referenčního ozubeného kola pro satelit	$\sigma_{FE2}$
	Bezpečnost v ohybu (centrální kolo)	$S_{F1}$
	Bezpečnost v ohybu (satelit)	$S_{F2}$

## Přípustné napětí v ohybu v patě zubu

- Obdoba Marinovy rovnice – mez únavy vzorku  $\sigma_{Flim}$  korigována součiniteli Y

$$\sigma_{FP1} = \frac{\sigma_{FE1} Y_{NT1}}{S_{Fmin}} Y_X Y_{\delta relT} Y_{RrelT}$$

$$\sigma_{FP2} = \frac{\sigma_{FE2} Y_{NT2}}{S_{Fmin}} Y_X Y_{\delta relT} Y_{RrelT}$$

$$S_{Fmin} = 1,5 \text{ (zadáno)}$$

## Mez únavy v ohybu referenčního ozubeného kola

$$\sigma_{FE1} = \sigma_{Flim1} Y_{ST} Y_{A1}$$

$$\sigma_{FE2} = \sigma_{Flim2} Y_{ST} Y_{A2}$$

- **Součinitel koncentrace napětí pro referenční ozubené kolo**

$$Y_{ST} = 2$$

- **Součinitel střídavého zatížení  $Y_A$**

- Pro střídavý cyklus napětí v patě zubu (vložená kola, reverzace otáček) se doporučuje použít 70 % hodnoty meze únavy v ohybu





# Výpočet únosnosti zubů v ohybu

Kontrolní list		
T.	Parametr	
5.	Součinitel tvaru zubu (centrální kolo)	$Y_{Fa1}$
	Součinitel tvaru zubu (satelit)	$Y_{Fa2}$
	Součinitel koncentrace napětí (centrální kolo)	$Y_{Sa1}$
	Součinitel koncentrace napětí (satelit)	$Y_{Sa2}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (centrální kolo)	$Y_{NT1}$
	Součinitel počtu cyklů pro ohyb (satelit)	$Y_{NT2}$
	Poměrný součinitel vrubové citlivosti	$Y_{\delta relT}$
	Poměrný součinitel drsnosti	$Y_{RrelT}$
	Mez únavy v ohybu referenčního ozubeného kola pro satelit	$\sigma_{FE2}$
	Bezpečnost v ohybu (centrální kolo)	$S_{F1}$
	Bezpečnost v ohybu (satelit)	$S_{F2}$

## Bezpečnosti proti vzniku únavového lomu v patě zubu

- Podíl korigované meze únavy v dotyku a napětí v ohybu

$$S_{F1} = \frac{\sigma_{FE1} Y_{NT1}}{\sigma_{F1}} Y_{\delta relT} Y_{RrelT} Y_X$$

$$S_{F2} = \frac{\sigma_{FE2} Y_{NT2}}{\sigma_{F2}} Y_{\delta relT} Y_{RrelT} Y_X$$

- Běžně  $S_F = 1.4 \div 1.6$
- Při vyšším riziku škod  $S_F > 3$

## Bezpečnost v ohybu $S_{F1}$ a $S_{F2}$

1,5 – 2,5	velmi dobré
2,5 – 3,5	dobré
3,5 – 4,5	dostačující
> 4,5	konzultace

Děkuji vám za pozornost

**David Rebenda**

[David.Rebenda@vut.cz](mailto:David.Rebenda@vut.cz)

<http://uk.fme.vutbr.cz/>