

6KT

KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ - PŘEVODY

David Rebenda

David.Rebenda@vut.cz

A2/401

Ústav konstruování

Fakulta strojního inženýrství

VUT v Brně

3. cvičení



Náplň třetího 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.	Pevnostní kontrola ozubení v ohybu



Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrdost na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrdost na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

Silové poměry v ozubení

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotkových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

Výkon a momenty v planetových převodech

- Rozlišujeme:

- Celkový krouticí moment

$$M = \frac{P}{2\pi n}$$

- Jmenovitý krouticí moment

$$M_t = \frac{M}{a_K} = F_t \frac{d}{2}$$

Síly v čelním ozubení s přímými zuby

- Rozlišujeme:

- Obvodová síla (tečná)

$$F_t = \frac{P_j}{v} = \frac{2M_t}{d}$$

- Radiální síla

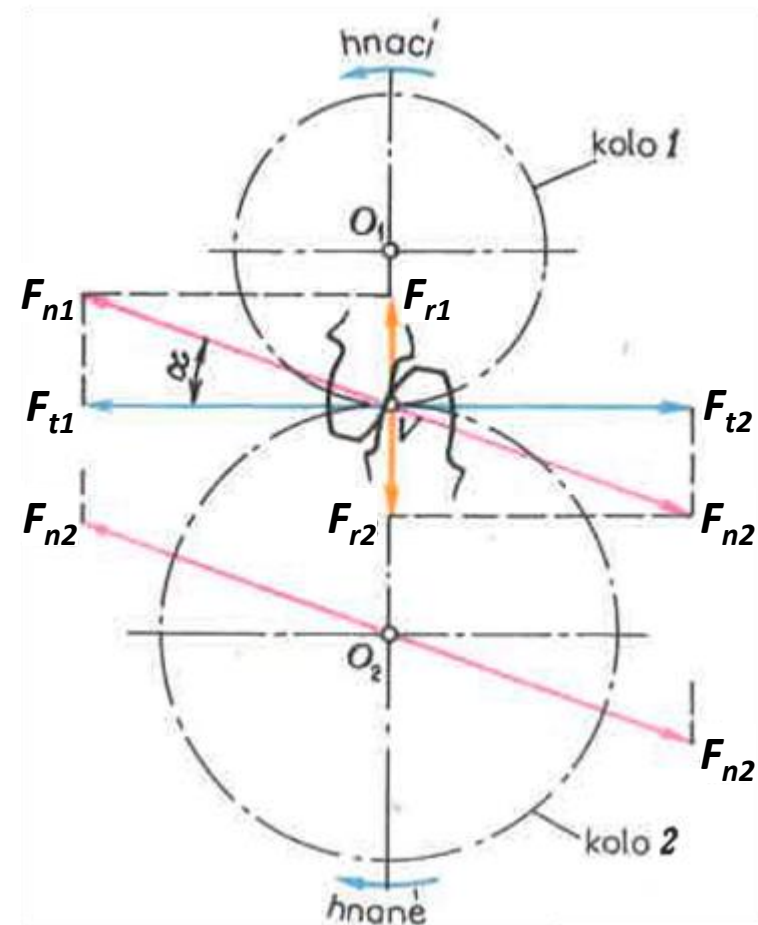
$$F_r = F_t \tan \alpha$$

- Normální síla

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \alpha}$$

Síly a momenty na pastorku

- Výstupní krouticí moment $M_4 = M_1 |i_{14}|$



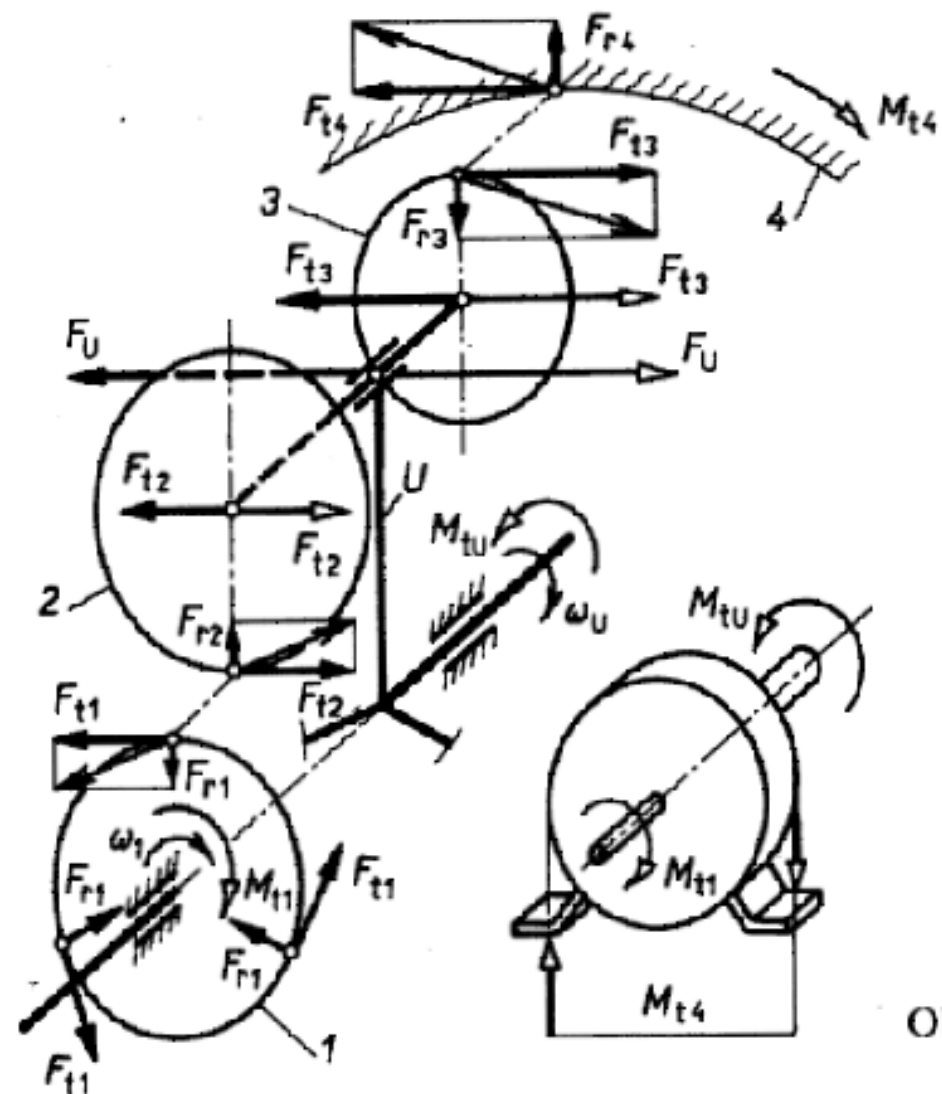
Silové poměry v ozubení

Kontrolní list

T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotkových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

• Předpoklady:

- Zanedbání ztrát – tj. 100% účinnost
- Síly se rovnoměrně rozloží na satelity
- Při záběru nevznikají axiální síly
- Radiální síly se vzájemně vyruší (akce-reakce)
- Vnější ozubení je více namáháno než ozubení vnitřní → pevnostní kontrola pouze soukolí centrální kolo - satelit



Volba materiálu ozubených kol a tvrdosti na boku zubu

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrdoost na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrdoost na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů	Z_E
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_F
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

- **Litá ocel s povrchovým kalením po boku zubu**, stupeň kvality ML (cca ČSN 42 212120)
 - Pořadové číslo 49 (dotyk) $A = 0.74$; $B = 602$
 - Pořadové číslo 52 (ohyb) $A = 0.305$; $B = 76$
- **Tvrdoost kol** (volit v jednotkách HV)
 - Určuje se na základě materiálových listů (pro třídy materiálů v daném rozsahu)
 - Kolo s větším počtem cyklů (**podklady**) je zpravidla o 20 až 60 HB tvrdší
- **Mez únavy v dotyku a ohybu pro danou třídu materiálů** (str. 1145)

Tab. A-34 (pokračování)

Charakteristiky materiálů pro ozubená kola a konstanty A a B pro výpočet mezí únavy v dotyku σ_{Hlim} a v ohybu σ_{Flim} z rovnice $\sigma_{Hlim} = AH + B$, resp. $\sigma_{Flim} = AH + B$, pro počet cyklů $5 \cdot 10^7$ až 10^9 pro dotyk a $3 \cdot 10^6$ cyklů pro ohyb. (Výběr z ISO 6336-5:2003)

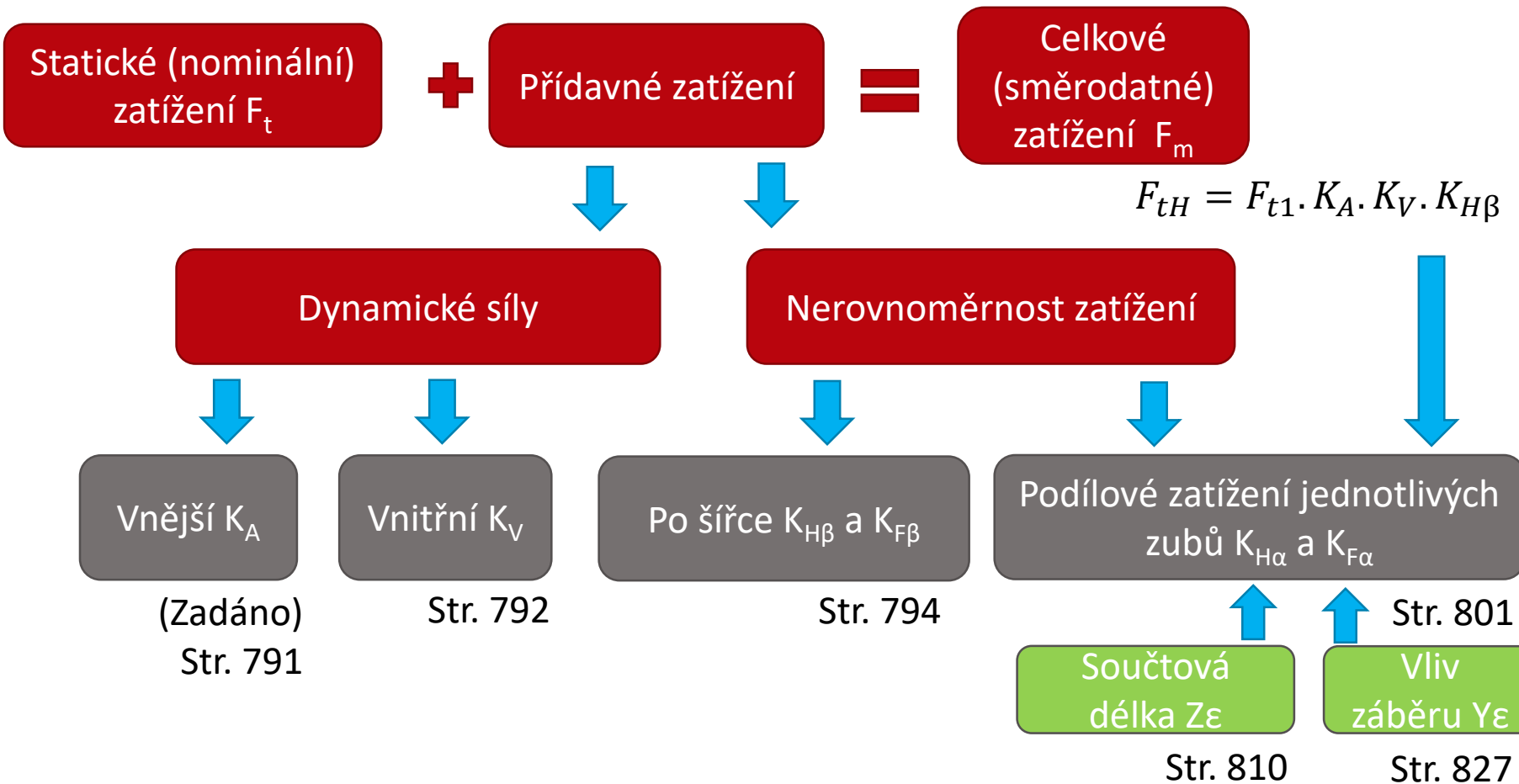
poř. čís.	materiál	typ	zkratka	typ napětí	stupnice tvrdosti	tvrdoost povrchu H		konstanty		stupeň kvality	σ_{Hlim} (MPa)		σ_{Flim} (MPa)				
						min.	max.	A	B		min.	max.	min.	max.			
21	zušlechťené tvárené oceli	uhlíkové oceli	V	v dotyku	HV	135	210	0,963	283	ML	413	485					
22						135	210	0,925	360	MQ	485	554					
23						135	210	0,838	432	ME	545	608					
24						200	360	1,313	188	ML	450	661					
25						legované oceli	V	HV	200	360	1,313	373	MQ	635	846		
26									200	390	2,213	260	ME	702	1123		
27		uhlíkové oceli	V	v ohybu	HV	115	215	0,250	108	ML			137	162			
28						115	215	0,240	163	MQ			191	215			
29						115	215	0,283	202	ME			235	263			
30						200	360	0,423	104	ML			189	256			
31						legované oceli	V	HV	200	360	0,425	187	MQ			272	340
32									200	390	0,358	231	ME			303	371

Součinitelé silových poměrů v ozubení

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotkových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

Napětí v dotyku pro pastorek

$$\sigma_H = Z_B \sigma_{H0} \sqrt{K_A K_V K_{H\beta} K_{H\alpha}}$$



Součinitelé silových poměrů v ozubení

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotkových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

3. cvičení

K_A

Záleží na charakteru hnacího a hnaného stroje (proměnlivost momentu, rázy)

Chod soustrojí	Pracovní stroj	K_A	
		A	B
Rovnoměrný	Rotací kompresory a dmychadla, generátory a dynama, vrtáčky, soustruhy, brusky aj.	1,0 až 1,1	1,05 až 1,2
Nerovnoměrný	Uhečné mlýny, zdvihací a transportní zařízení, jeřáby, pístové kompresory aj.	1,1 až 1,3	1,2 až 1,6
S rázy	Drtiče, pístová čerpadla, zemní stroje, výstředníkové lisý aj.	1,3 až 1,7	1,4 až 2,0

A – při pohonu elektromotorem nebo turbínou, B – při pohonu pístovým spalovacím motorem.

K_V

Důsledky dynamických jevů (dle přesnosti ozubení, max. obvodové rychlosti)

$$K_V = \left(\frac{A + \sqrt{200v}}{A} \right)^B$$

A, B Proměnné A a B jsou funkcí stupně přesnosti ozubení Q_{ISO} , která má 13 stupňů přesnosti (0-12).

v Mathcadu zadat $v_1/\text{ms}^{-1}!!!$

Součinitelé silových poměrů v ozubení

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

3. cvičení

K_V

Důsledky dynamických jevů (dle přesnosti ozubení, max. obvodové rychlosti)

$$K_V = \left(\frac{A + \sqrt{200v}}{A} \right)^B$$

A, B Proměnné A a B jsou funkcí stupně přesnosti ozubení Q_{ISO} , která má 13 stupňů přesnosti (0-12).

v Mathcadu zadat $v_1/ms^{-1}!!!$

- Pomocná proměnná A $A = 50 + 56(1 - B)$
- Pomocná proměnná B $B = 0.25(Q_{ISO} - 4)^{\frac{2}{3}}$
- Obvodová rychlost (vyšší hodnota) $v_1 = \pi d_1 n_1$

Součinitelé silových poměrů v ozubení

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

$K_{H\beta}, K_{F\beta}$

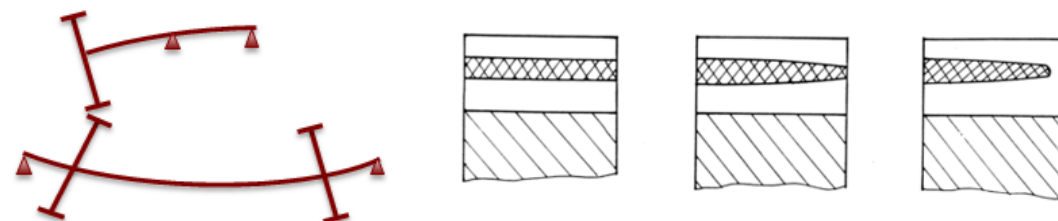
Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce **Ověření podmínek str. 794!!**

$F_{\beta y}, c_y$ - zadáno

$$K_{H\beta} = f(F_m, b, \dots)$$

Střední obvodová síla

$$F_m = F_t K_A K_V$$



Chyba v podmínce na str. 794!!!

$$\frac{F_{\beta y} c_y}{2F_m} < 1 \rightarrow K_{H\beta} = 1 + \frac{F_{\beta y} c_y}{2F_m} \quad \text{nebo} \quad \frac{F_{\beta y} c_y}{2F_m} \geq 1 \rightarrow K_{H\beta} = \sqrt{\frac{2F_{\beta y} c_y}{F_m}}$$

$$\frac{F_m}{b} < 100 \text{ Nmm}^{-1} \text{ pak } \frac{F_m}{b} = 100 \text{ Nmm}^{-1}$$

Součinitelé silových poměrů v ozubení

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

$K_{H\beta}, K_{F\beta}$

Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{N_f}$$

$$N_f = \frac{\left(\frac{b}{h}\right)^2}{1 + \frac{b}{h} + \left(\frac{b}{h}\right)^2}$$

- Exponent N_f
- b/h je menší z hodnot poměru šířky ozubení a výšky zubu pastorku a kola, pro $b/h < 3$ je $b/h = 3$ a pro $b/h > 12$ je $N_f = 1$

Součinitelé silových poměrů v ozubení

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

3. cvičení

$K_{H\alpha}, K_{F\alpha}$

Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů

$$\text{pro } \epsilon_\gamma \leq 2 \text{ je } K_{H\alpha} = K_{F\alpha} = \frac{\epsilon_\gamma}{2} (0,9 + 0,4q_\alpha),$$

$$\text{pro } \epsilon_\gamma > 2 \text{ je } K_{H\alpha} = K_{F\alpha} = 0,9 + 0,4 \sqrt{\frac{2(\epsilon_\gamma - 1)}{\epsilon_\gamma}} q_\alpha.$$

Směrodatná obvodová síla v čelní rovině

$$F_{tH} = F_t K_A K_V K_{H\beta}$$

Pomocný součinitel

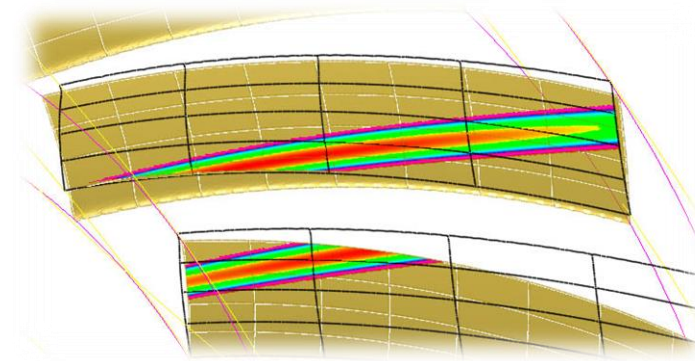
$$q_\alpha = \frac{c_\gamma (f_{pe} - y_\alpha)}{\frac{F_{tH}}{b}}$$

Mezní úchylka čelní rozteče z tab. A-36 f_{pt1}, f_{pt2}

Mezní úchylka základní rozteče

$$f_{pb1} = f_{pt1} \cos(\alpha_t)$$

Ověření podmínek str. 802!!



Součinitelé silových poměrů v ozubení

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

3. cvičení

$K_{H\beta}, K_{F\beta}$

Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů

Účinná úchylka základní rozteče

$$f_{pe} = \max(f_{pb1}, f_{pb2})$$

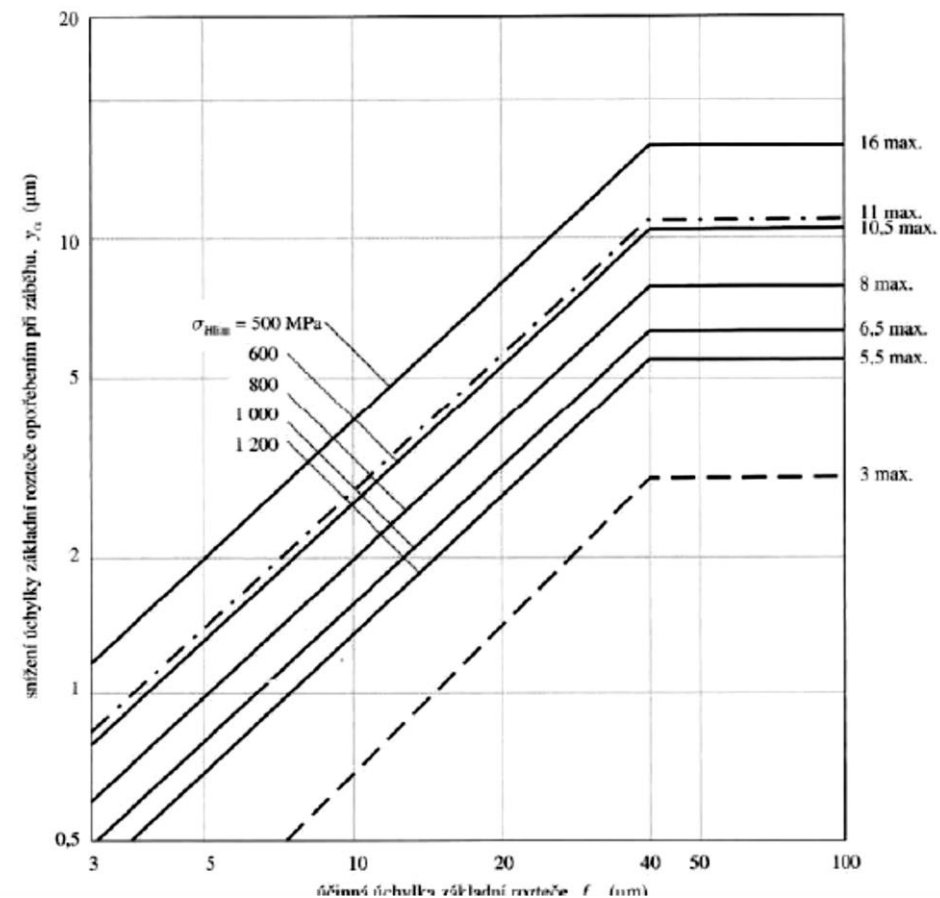
Snížení úchylky základní rozteče opotřebením při záběru – obr. 14-8a

$$y_\alpha = \frac{y_{\alpha1} + y_{\alpha2}}{2}$$

Pomocný součinitel

$$q_\alpha = \frac{c_\gamma (f_{pe} - y_\alpha)}{\frac{F_{tH}}{b}}$$

$K_{H\alpha}$ = dle podmínek na str. 802 (14-34), (14-35), (14-36)



Součinitelé silových poměrů v ozubení

Kontrolní list		
T.	Parametr	
3.	Vstupní krouticí moment	M_1
	Jmenovitý krouticí moment (centrální kolo)	M_{t1}
	Obvodová síla (centrální kolo)	F_{t1}
	Výstupní krouticí moment	M_4
	Obvodová síla na pastorku startéru	F_{t4}
	Tvrдость na boku zubu (centrální kolo)	H_1
	Tvrдость na boku zubu (satelit)	H_2
	Součinitel vnitřních dynamických sil	K_V
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro dotyk	$K_{H\beta}$
	Součinitel nerovnoměrnosti zatížení zubů po šířce pro ohyb	$K_{F\beta}$
	Součinitel součtové délky dotykových křivek boků zubů	Z_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v dotyku	$K_{H\alpha}$
	Součinitel vlivu záběru profilu	Y_ϵ
	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů v ohybu	$K_{F\alpha}$

3. cvičení

$K_{H\beta}, K_{F\beta}$

Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů

- Omezující podmínky

je-li $K_{H\alpha} > \epsilon_\gamma / \epsilon_\alpha Z_\epsilon^2$, pak $K_{H\alpha} = \epsilon_\gamma / \epsilon_\alpha Z_\epsilon^2$,

je-li $K_{H\alpha} < 1$, pak $K_{H\alpha} = 1$,

je-li $K_{F\alpha} > \epsilon_\gamma / \epsilon_\alpha Y_\epsilon$, pak $K_{F\alpha} = \epsilon_\gamma / \epsilon_\alpha Y_\epsilon$,

je-li $K_{F\alpha} < 1$, pak $K_{F\alpha} = 1$.

- Součinitel součtové délky dotykových křivek boku zubu

$$Z_\epsilon = \sqrt{\frac{4 - \epsilon_\alpha}{3}}$$

- Součinitel vlivu záběru profilu

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

Děkuji vám za pozornost

David Rebenda

David.Rebenda@vut.cz

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