

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



Katedra za strojne elemente in razvojna vrednotenja



Strojni elementi 2

Jermenska gonila z zobatimi jermeni

Gorazd Fajdiga, Marko Nagode

Prednosti:

- tečejo brez zdrsra, kar ima za posledico enakomeren prenos vrtilnega gibanja in miren tek gonila
- potrebne so manjše sile prednapetja jermena
- v primerjavi z verižnimi gonili povzročajo precej manjši hrup, ne zahtevajo posebnega vzdrževanja (mazanja) in se manj obrabljajo

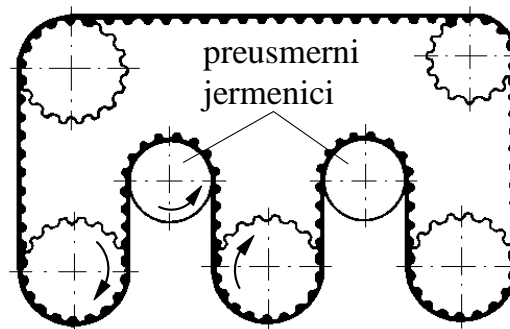
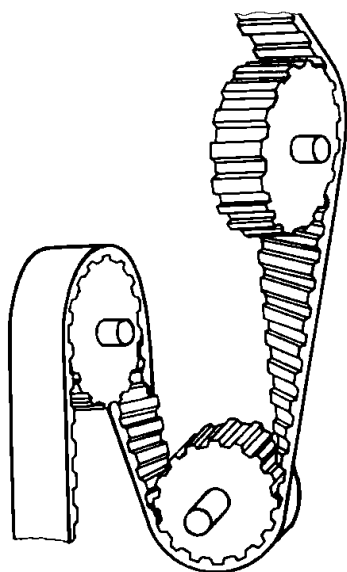
Slabosti:

- večja občutljivost na agresivne medije (kisline, lugi itd.)
- večji stroški zaradi zahtevnejše izdelave zobatih jermenic
- večja občutljivost na preobremenitve (ploščati in klinasti jermeni pri preobremenitvi zdrsnejo)

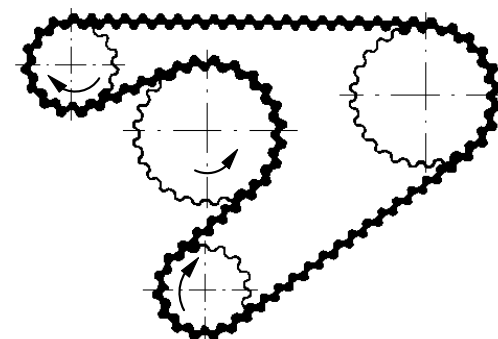
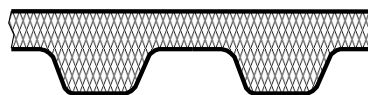
Uporaba:

- v računalništvu (tiskalniki, risalniki)
- za fotokopirne stroje
- gospodinjske aparate
- industrijske robote
- naprave za krmiljenje
- z razvojem novih visokotrdnostnih zobatih jermenov se uporabljajo tudi v splošni strojogradnji
- pri motorjih z notranjim zgorevanjem (pogon odmične gredi pri motornih vozilih)

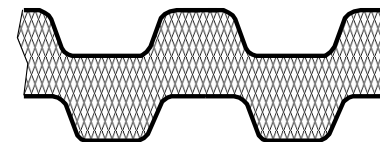




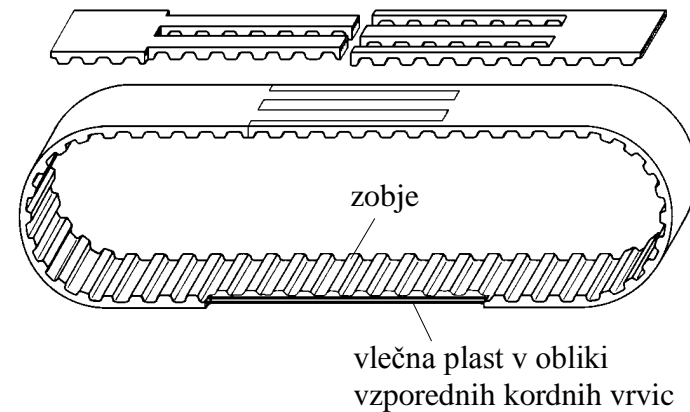
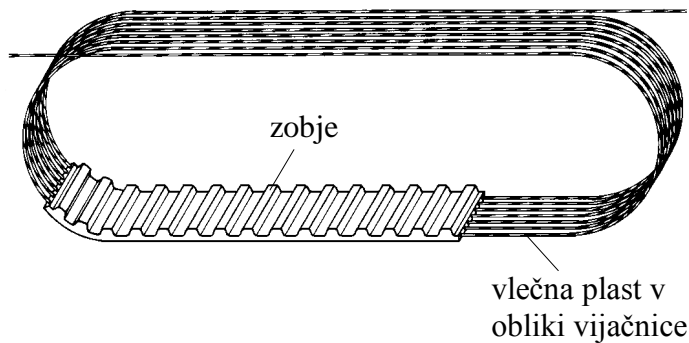
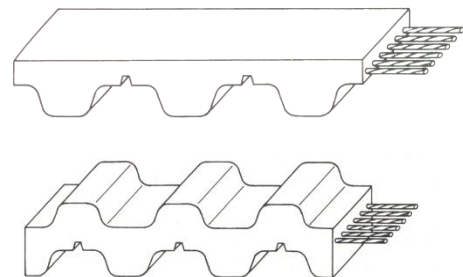
Enostransko ozobljeni jermen



Obojestransko ozobljeni jermen



- osnovno gradivo je neopren in poliuretan



Lastnosti vlečne plasti:

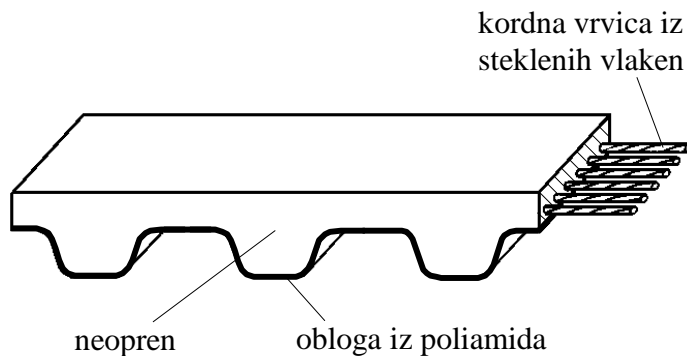
- visoka natezna trdnost
- sposobnost ovijanja okrog jermenic
- pri prenosu obremenitev se sme le malo raztezati
- zagotavljati predvideno življenjsko dobo jermena

Material vlečne plasti:

- kordne vrvice iz jekla
- steklena vlakna
- kevlar
- če ima osnovno gradivo slabšo odpornost proti obrabi (npr. neopren), zobje jermena dodatno prevlečeni



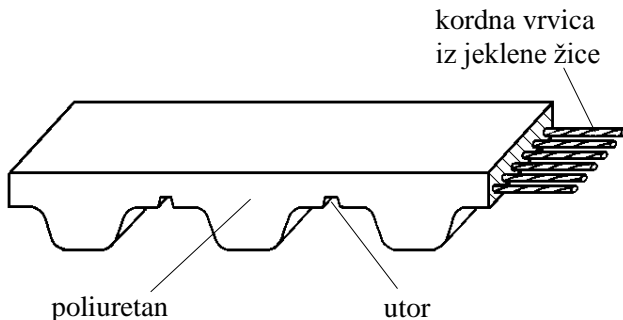
- iz neoprena po DIN ISO 5296



a)

Oznaka profila: **MXL, XL, L, H, XH, XXH**

- iz poliuretana po DIN 7721

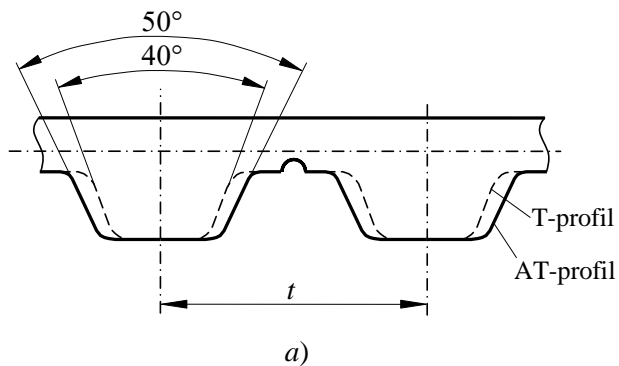


b)

Oznaka profila: **T 2,5, T5, T10, T20**

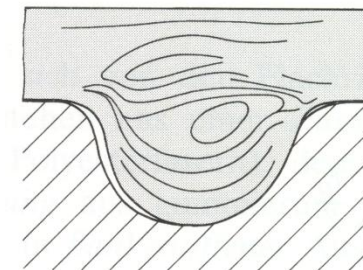
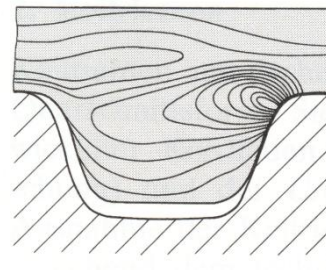
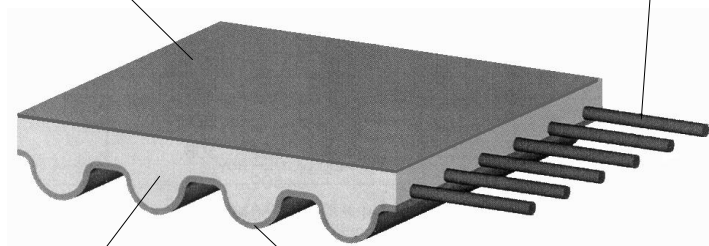


- iz poliuretana z AT-profilom



zaščitna plast iz
odpornega neoprena

kordna vrstica iz
steklenih vlaken



zobje iz neoprena

obloga iz poliamida

Oznaka profila: **3M, 5M, 8M, 14M, 20M**



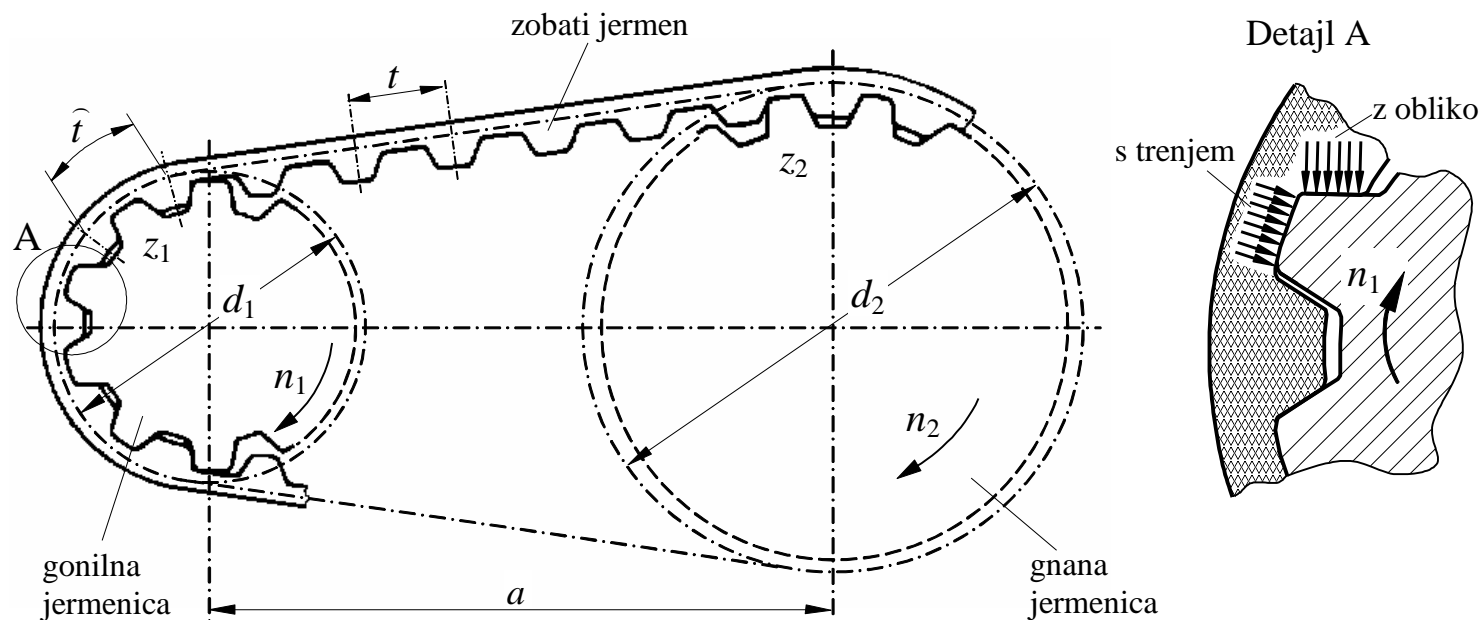
- za zobato jermenico s številom zob z in delitvijo medzobij \hat{t} sledi iz pogoja $\pi \cdot d = z \cdot \hat{t}$ računski \hat{t} premer jermenice

$$d = \frac{\hat{t}}{\pi} \cdot z = \frac{t}{\pi} \cdot z = m \cdot z$$

d	[mm]	računski premer jermenice
z		število zob jermenice
\hat{t}	[mm]	delitev medzobij jermenice
t	[mm]	delitev zob jermena
m	[mm]	modul; $m = t / \pi$

- prestavno razmerje gonila

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1}$$



- sila na gred pri mirovanju F_{G0}

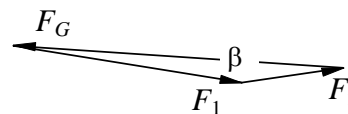
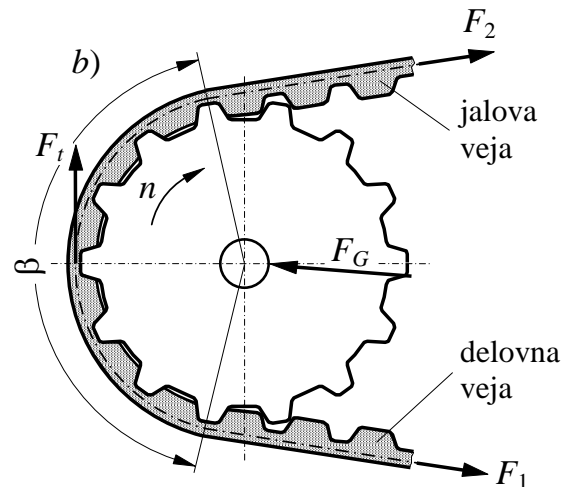
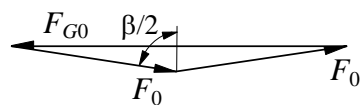
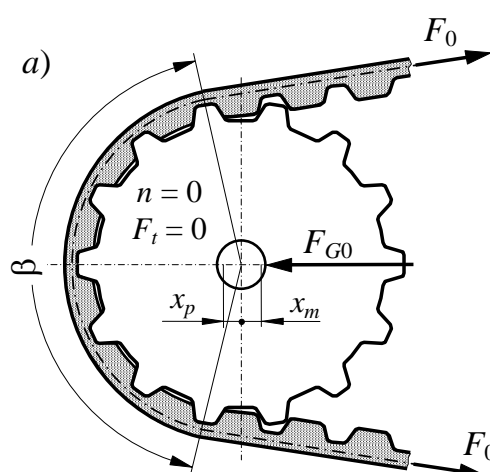
$$F_{G0} = 2 \cdot F_0 \cdot \sin \frac{\beta}{2}$$

F_0
 β

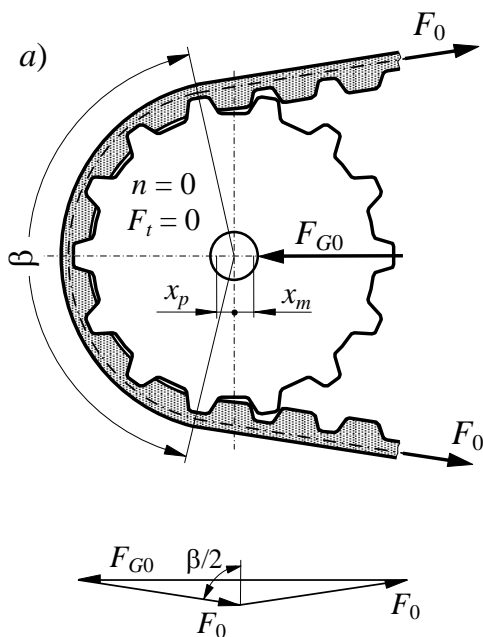
[N] sila v veji jermena pri mirovanju
[°] objemni kot jermena na jermenici

- sila na gred pri obratovanju F_G

$$F_G = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \beta}$$



- potrebne sile prednapetja so manjše kot pri ploščatih in klinastih jermenih
- napenjanje jermena z elastično raztegnitvijo



$$x_m \geq 0,015 \cdot L$$

$$x_p \geq 0,01 \cdot L$$

x_m	[mm] najmanjša potrebna razdalja za montažo jermena
x_p	[mm] najmanjša potrebna razdalja za prednapetje jermena
L	[mm] računska dolžina jermena

- potrebni sili v vejah jermena pri mirovanju F_0 (izkustvena enačba)

$$F_0 = C_z \cdot F_t + q \cdot v^2 \cdot b$$

C_z	koeficient dolžine (števila zob z_B) jermena
q [kg/mm·m]	specifična masa jermena na mm širine in m dolžine
v [m/s]	hitrost jermena
b [mm]	širina jermena

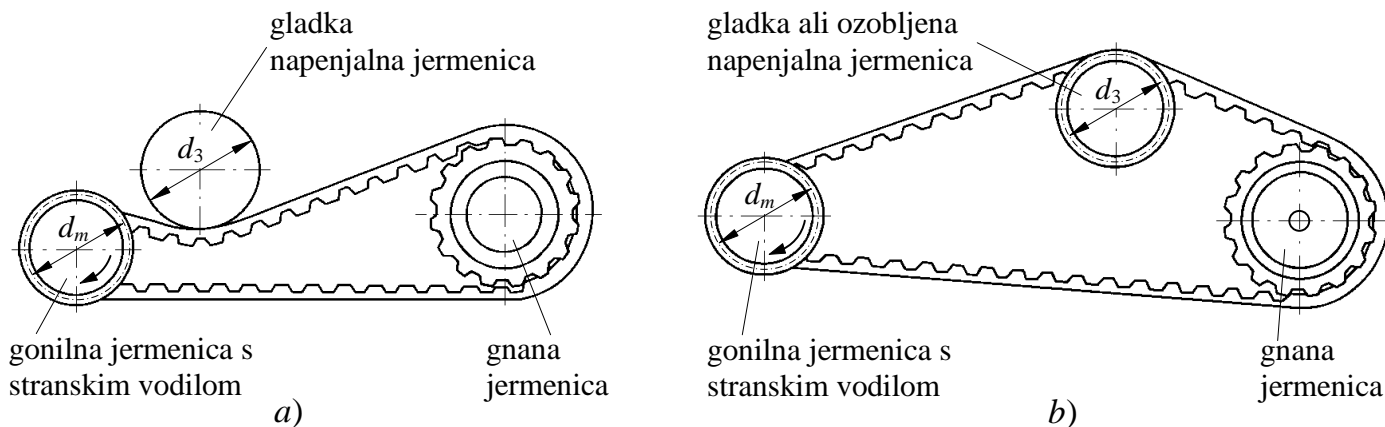
- kontrolo prednapetja: jermen je pravilno napet takrat, ko je pri kontrolni sili $F_k \approx F_t / 20$ povese jermena enak:

$$s_k \approx \frac{l_v}{50}$$

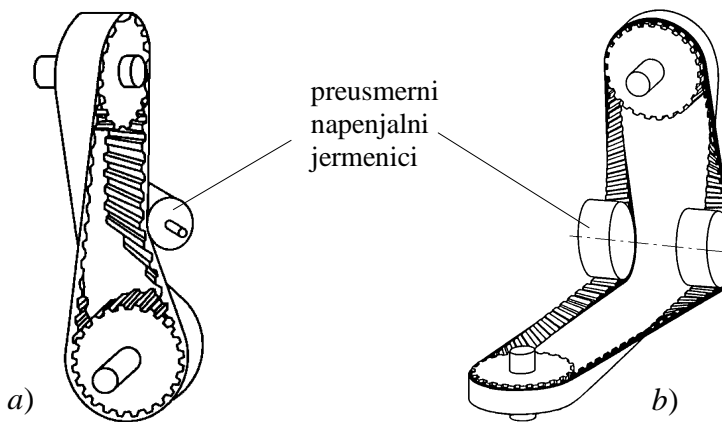
s_k	[mm]	kontrolni povese jermena
l_v	[mm]	dolžina-enako kot pri klinastih jermenih



- napenjanje jermena z napenjalno jermenico



a) napenjalna jermenica na zunanji strani b) napenjalna jermenica na notranji strani

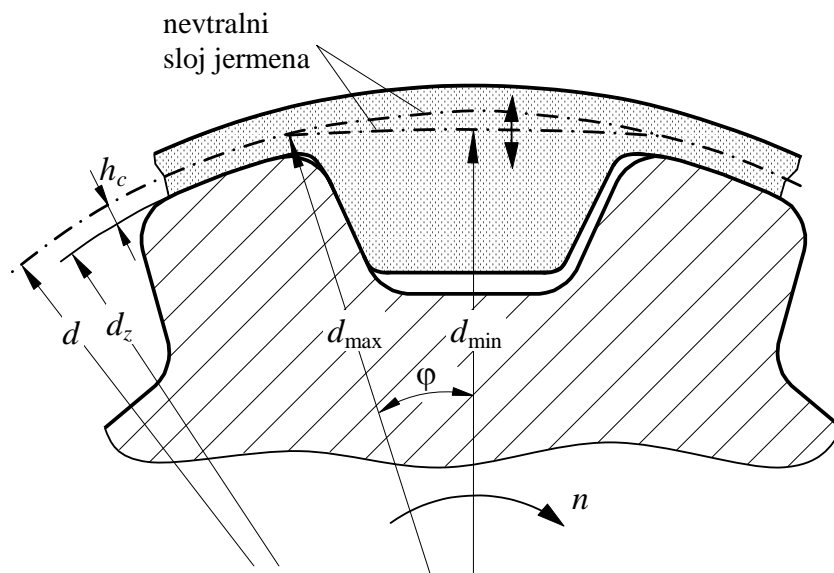


Preusmerne napenjalne jermenice pri prostorskih jermenskih gonilih



poligonski efekt vrednotimo s stopnjo neenakomernosti vrtilnega gibanja po enačbi:

$$\delta = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{sr}} = 2 \cdot \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max} + d_{\min}}$$



$$d_{\max} = d$$

$$d_{\min} \approx d \cdot \cos \varphi$$

d teoretični računski premer jermenice

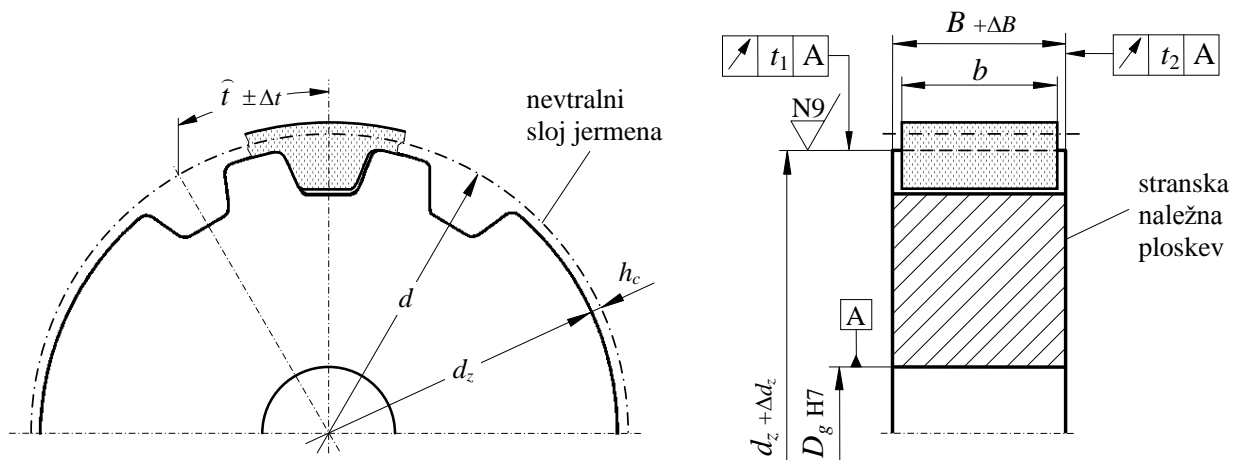
φ konstrukcijska veličina



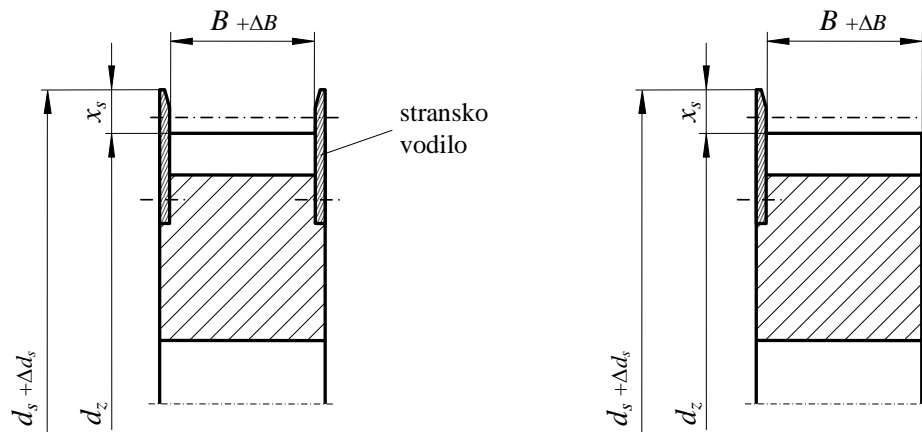
Material

-aluminijeve zlitine (AlCuMgPb), konstrukcijska jekla (E295) ali jekla za poboljšanje (C45), tudi umetne snovi

Jermenica za standardne zobate jermene s trapeznim profilom



Uporaba stranskih vodil pri zobatih jermenicah



Izhodišče so projektni vhodni podatki:

- prenosna moč P ,
- vrtilna frekvenca gonilne gredi n_1 ,
- vrtilna frekvenca gnane gredi n_2 ali prestavno razmerje i ,
- karakteristike pogonskega in delovnega stroja,
- obratovalni pogoji (obratovalni čas, vplivi okolja itd).

Sledi:

- zasnova gonila (izbrati vrsto in profil jermena ter število zob obeh jermenic)
- določitev ostalih geometrijskih veličin (premera jermenic, medosje, dolžina jermena)
- kontrola hitrosti in upogibne frekvence jermena
- določitev potrebne širine jermena
- določitev veličin za prednapetje jermena



Preračun jermenskih gonil z zobatimi jermeni

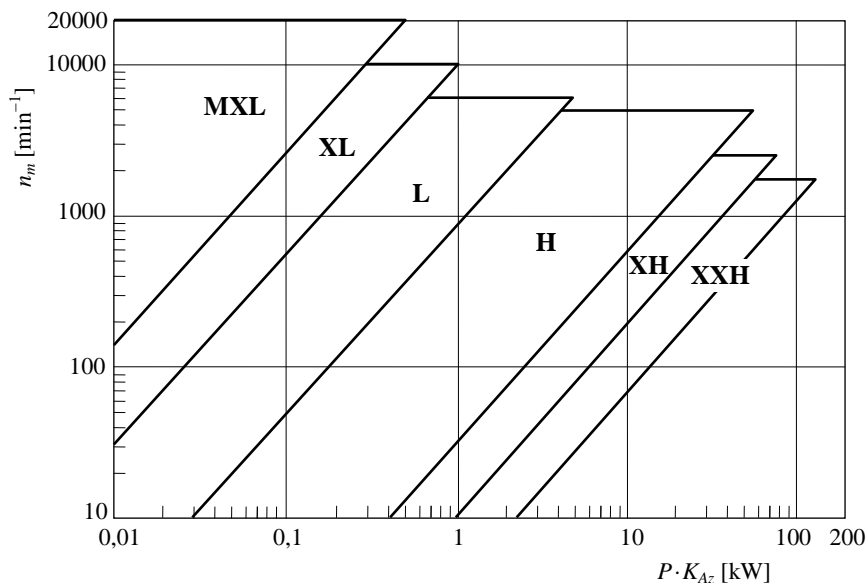
Zasnova gonila

- **izbira vrste jermena**: zobati jermen iz neoprena s trapeznim profilom, zobati jermen iz poliuretana s trapeznim profilom, zobati jermen s HTD-profilom

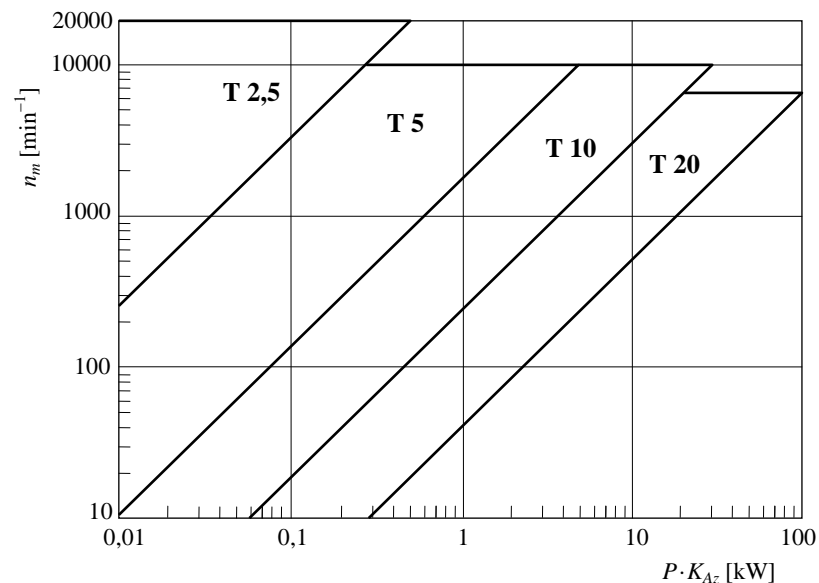
- **izbira profila jermena** : ustrezen profil jermena (delitev zob t) za izbrani zobati jermen

$$K_{Az} \approx K_A \cdot C_k + C_i$$

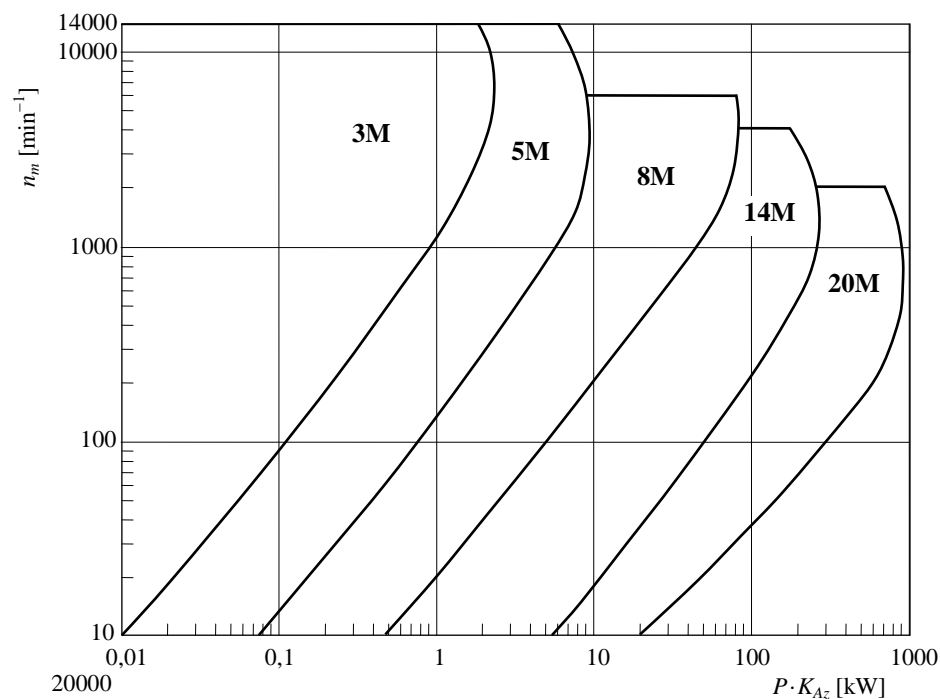
Izbira profila standardnih zobatih jermenov iz neoprena po DIN ISO 5296



Izbira profila standardnih zobatih jermenov iz poliuretana po DIN 7721



Izbira profila zobatih jermenov s HTD-profilom



- določitev števila zob jermenic

- izpolnjen pogoj $z_m \geq z_{\min}$, pri čemer je z_{\min} najmanjše dopustno število zob (tabela)

- če je manjša jermenica gonilna ($z_1 = z_m$) sledi število zob gnane jermenice:

$$z_2 = i \cdot z_1$$

 z_2

število zob gnane jermenice

 z_1

število zob gonilne jermenice

 i prestavno razmerje; $i = n_1 / n_2$ 

Preračun jermenskih gonil z zobatimi jermeni

Zasnova gonila

Veličine za preračun jermenskih gonil z zobatimi jermeni

Profil jermena	$z_{min}^{1)}$	z_{max}	n_{max} [min ⁻¹]	P_{max} [kW]	q [kg/mm·m]	v_{max} [m/s]	f_{max} [s ⁻¹]
MXL	10	150	20000	0,5	$1,0 \cdot 10^{-3}$	80	100
XL	10	120	10000	1	$2,7 \cdot 10^{-3}$	80	
L	10	150	7000	5	$3,8 \cdot 10^{-3}$	60	
H	14	156	5000	50	$5,8 \cdot 10^{-3}$	50	
XH	18	150	2500	80	$13,9 \cdot 10^{-3}$	40	
XXH	18	120	2000	120	$17,9 \cdot 10^{-3}$	40	
T 2,5	10	72	20000	0,5	$1,5 \cdot 10^{-3}$	80	100
T 5	10	84	10000	5	$2,3 \cdot 10^{-3}$	80	
T 10	12	96	10000	30	$4,7 \cdot 10^{-3}$	60	
T 20	15	96	6500	100	$8,0 \cdot 10^{-3}$	40	
3M	10	150	14000	2	$2,5 \cdot 10^{-3}$	80	100
5M	14	150	14000	9	$3,3 \cdot 10^{-3}$	80	
8M	20	192	6000	80	$6,3 \cdot 10^{-3}$	45	
14M	28	192	4000	200	$9,6 \cdot 10^{-3}$	30	
20M	34	192	2000	800	$12,5 \cdot 10^{-3}$	25	

z_{min} najmanjše dopustno število zob jermence

z_{max} največje priporočljivo število zob jermence

n_{max} največja vrtilna frekvenca jermence

P_{max} največja prenosna moč

q specifična masa jermena na mm širine in m dolžine

v_{max} največja dovoljena hitrost jermena

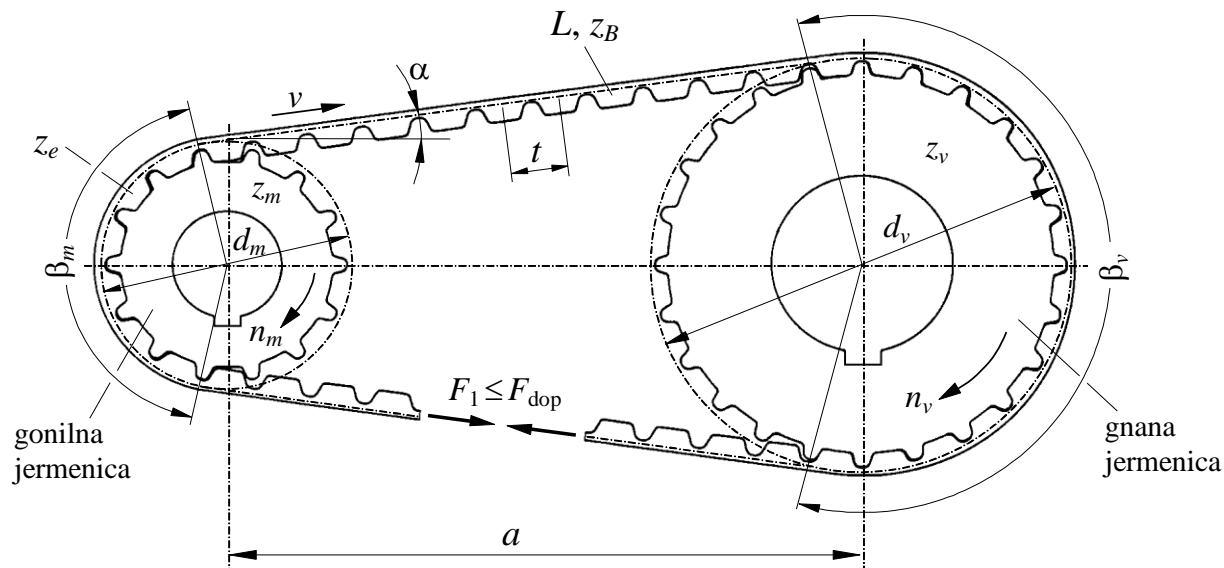
f_{max} največja dovoljena upogibna frekvenca jermena



Preračun jermenskih gonil z zobatimi jermeni

Določitev ostalih geometrijskih veličin

- namesto indeksov 1 (gonilni) in 2 (gnani) uporabimo indeksa m (manjša jermenica) in v (večja jermenica)



- računski premera jermenic

$$\left. \begin{aligned} d_m &= \frac{z_m \cdot t}{\pi} \\ d_v &= \frac{z_v \cdot t}{\pi} \end{aligned} \right\} \text{ne zaokrožimo}$$

d_m, d_v [mm] računski premer manjše (m), večje (v) jermenice
 z_m, z_v število zob manjše (m), večje (v) jermenice
 t [mm] delitev zob jermena

- orientacijsko medosje a_0

$$\left[0,5 \cdot (d_m + d_v) + 15 \text{ mm} \right] \leq a_0 \leq 2 \cdot (d_m + d_v)$$



Preračun jermenskih gonil z zobatimi jermeni

Določitev ostalih geometrijskih veličin

- kot nagiba jermenske veje α

$$\sin \alpha = \frac{t \cdot (z_v - z_m)}{2 \cdot \pi \cdot a_0}$$

- objemna kota jermenic

$$\beta_m = 180 - 2 \cdot \alpha$$

$$\beta_v = 180 + 2 \cdot \alpha$$

β_m, β_v

[°]

objemni kot na manjši (m), večji (v) jermenici

- dolžina jermena

- najprej se določi orientacijska dolžina jermena L_0

$$L_0 = 2 \cdot a_0 \cdot \cos \alpha + \frac{t}{2} \cdot (z_v + z_m) + \frac{\alpha \cdot t}{180} \cdot (z_v - z_m) \rightarrow$$

iz tabel se izbere najbližjo dejansko-standardno dolžino jermena L

- dejansko medosje a

$$a = \frac{f_1 + \sqrt{f_1^2 - f_2}}{8}$$

f_1

[mm]

pomožna veličina; $f_1 = 2 \cdot L - t \cdot (z_v + z_m)$

f_2

[mm²]

pomožna veličina; $f_2 = 8 \cdot [t \cdot (z_v - z_m) / \pi]^2$



zaradi spremembe medosja se spremenijo tudi kot nagiba jermenske veje α in objemna kota jermenic β_m in β_v



- hitrost jermena v

$$v = \frac{z_1 \cdot n_1 \cdot t}{60 \cdot 10^3} \leq v_{\max}$$

z_1
 n_1 [min⁻¹]
 t [mm]
 v_{\max} [m/s]

število zob gonilne jermenice
vrtilna frekvenca gonilne jermenice
delitev zob jermena
največja dovoljena hitrost jermena, **tabela**

- upogibna frekvenca jermena f_u

$$f_u = 10^3 \cdot \frac{v \cdot K}{z_B \cdot t} \leq f_{u \max}$$

K
 z_B
 T [mm]
 $F_{u \max}$ [s⁻¹]

število vseh jermenic; $K = 2$ pri enostavnem odprtem jermenskem gonilu
število zob jermena, tabele
delitev zob jermena
največja dovoljena upogibna frekvenca jermena, tabela



- obodna sila F_t

$$F_t = \frac{P \cdot K_{Az}}{v}$$

K_{Az}

koeficient obratovanja zobatih jermenov

- potrebna širina zobatih jermenov iz neoprena po DIN ISO 5296

$$b \geq b_R \cdot \left(\frac{F_t}{F_t^* \cdot k_z \cdot b_R} \right)^{\frac{1}{1,14}}$$



zaokrožimo na prvo večjo standardno vrednost

b	[mm]	potrebna širina jermena
b_R	[mm]	referenčna širina jermena, tabela
F_t	[N]	obodna sila
F_t^*	[N/mm]	dopustna obodna sila na milimeter širine jermena, tabela
k_z		koeficient števila zob v ubiru
		$k_z = 1,0$ pri $z_e \geq 6$
		$k_z = 1 - 0,2 \cdot (6 - z_e)$ pri $z_e < 6$

- kontroliramo še natezno silo v delovni veji jermena

$$F_1 \leq F_{dop}$$

F_1

[N]

natezna sila v delovni veji jermena

F_{dop}

[N]

dopustna natezna obremenitev vlečne plasti jermena; $F_{dop} = b \cdot F_r$



- potrebna širina zobatih jermenov iz poliuretana po DIN 7721

$$b \geq \frac{F_t}{F_t^* \cdot z_e \cdot k_n}$$

z_e število zob v ubiru na manjši jermenici
 če je $z_e > 12$, vzamemo $z_e = 12$
 k_n koeficient vrtilne frekvence
 $k_n = C_1 \cdot \ln(n_m) + C_2$ C_1, C_2 pomožni veličini, tabela

zaokrožimo na prvo večjo standardno vrednost

- kontroliramo natezno silo v delovni veji jermena

$$F_1 \leq F_{\text{dop}}$$

F_1 [N] natezna sila v delovni veji jermena
 F_{dop} [N] dopustna natezna obremenitev vlečne plasti jermena; **tabela**

- dopustna obodna sila na milimeter širine jermena F_t^*

- na osnovi rezultatov preskusov testnih gonil določimo dopustno obodno silo na milimeter širine jermena po izkustveno po enačbi

$$F_t^* = \frac{2,4}{z_m \cdot t} \cdot (C_1 \cdot k_1 + C_2 \cdot k_2 \cdot n_m + C_3 \cdot k_3 \cdot n_m^2)$$

z_m število zob manjše jermenice
 t [mm] delitev zob jermena
 n_m [min⁻¹] vrtilna frekvenca manjše jermenice
 C_1, C_2, C_3 pomožne veličine, tabela
 k_1, k_2, k_3 korekturni koeficienti, tabela

