

ZUPČANI PRIJENOSNICI

Zupčani prijenosnici

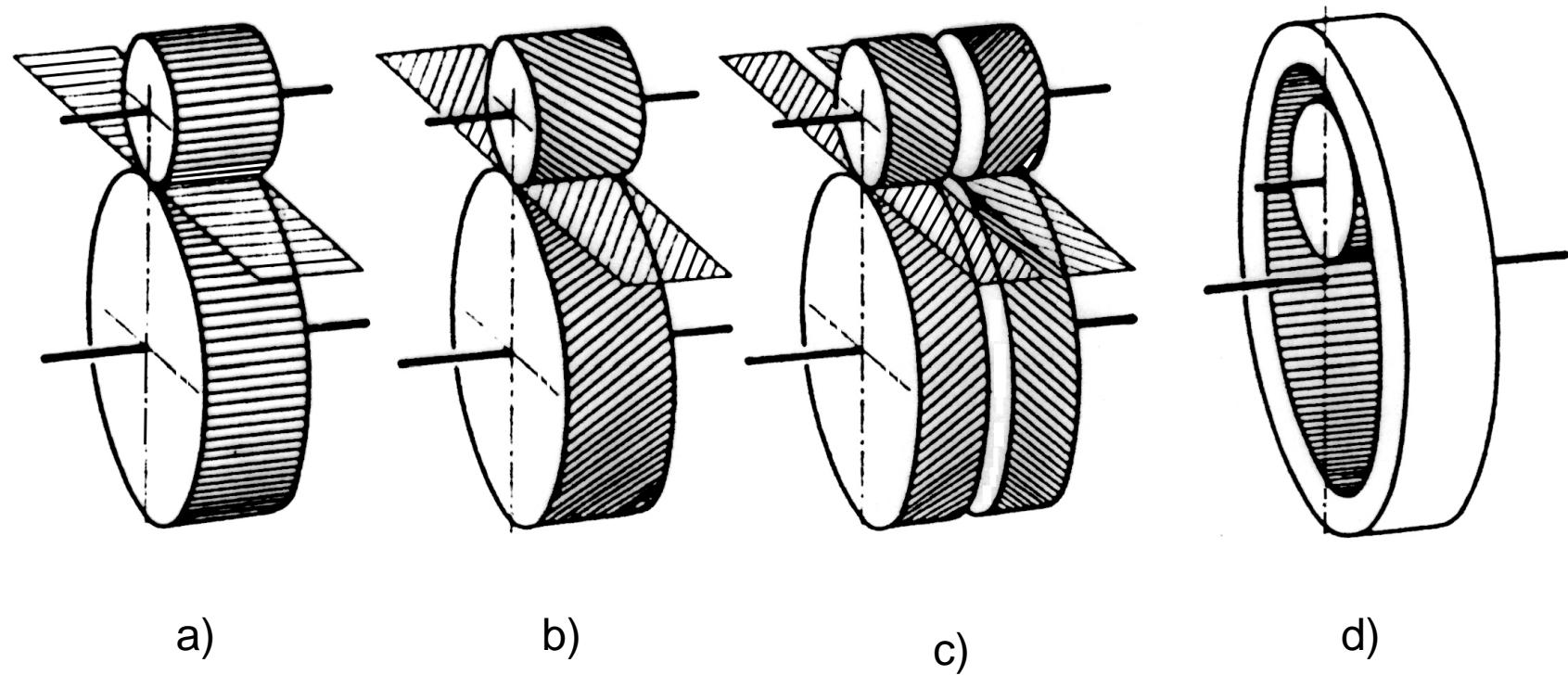
- Od svih prijenosnika ova je grupa prijenosnika danas najčešće u primjeni. Izrađuju se s različitim položajem osi (paralelene, ukrštene itd.) od najmanjih do najvećih snaga. Upotrebljavaju se i za veoma visoke brojeve okretaja te u širokom rasponu prijenosnih odnosa.
- Zbog prijenosa sile oblikom prijenosni omjer im je čvrst (ne zavisi o opterećenju) pa se upotrebljavaju i kao prijenosnici točnog gibanja.
- Imaju veliku pogonsku sigurnost i dug vijek trajanja uz mogućnost kratkotrajnog preopterećenja. Održavanje je relativno jednostavno.
- U prednosti im se može još nabrojati velika mogućnost prijenosa snage po jedinici volumena te visok stupanj iskorištenosti prenesene snage

Zupčani prijenosnici

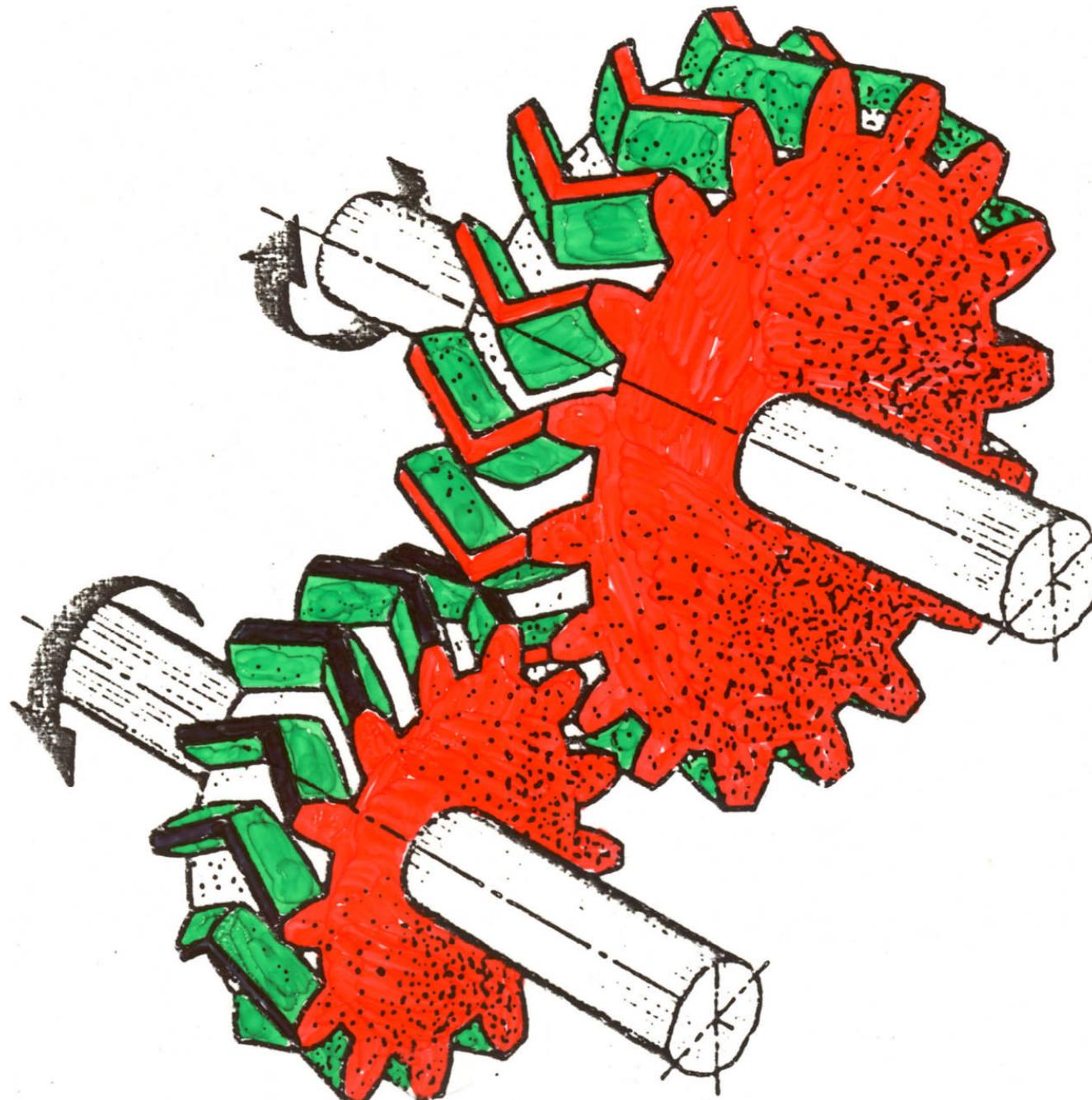
- **Prednosti:**
 - visok stupanj djelovanja ($\geq 0,98$)
 - velika trajnost i izdržljivost
 - male dimenzije
 - mogu se upotrebljavati za prijenos od najmanjih do najvećih snaga, te od najmanje do najveće brzine vrtnje
- **Nedostaci:**
 - najskuplji od mehaničkih prijenosnika (izuzev pužnih)
 - vibracije i šumovi zbog krutog prijenosa okretnog momenta
 - zahtijeva se vrlo točna obrada

Zupčanički prijenosnici s čelnicima s ravnim i kosim zubima te unutrašnjim i vanjskim ozubljenjem

- U jednom stupnju prijenosa može se ostvariti prijenosni omjer oko 8 (ekstremno, s kosim zubima i do 20). Vratila su im u pravilu paralelna. Sa dva stupnja prijenosa moguće je ostvariti prijenosni odnos 45 (60), a sa tri stupnja prijenosa do 200 (300). Izvode se za snage do oko 20 000 kW i ulazne brojeve okretaja do 100 000 1/min, odnosno, obod-ne brzine do 200 m/s. Iskoristivost im se kreće po stupnju prijenosa i do 99,5%, zavisno od izvedbe i veličine.
- Mirniji hod postiže se primjenom čelnika s kosim zubima (veći stupanj prekrivanja), ali se s povećanjem kuta kosine zuba povećava i aksijalna sila, što postavlja dodatne zahtjeve za uležištenja.
- Kod malih snaga mirnoća hoda postiže se i ugradnjom jednog čelnika u paru od umjetnih materijala.

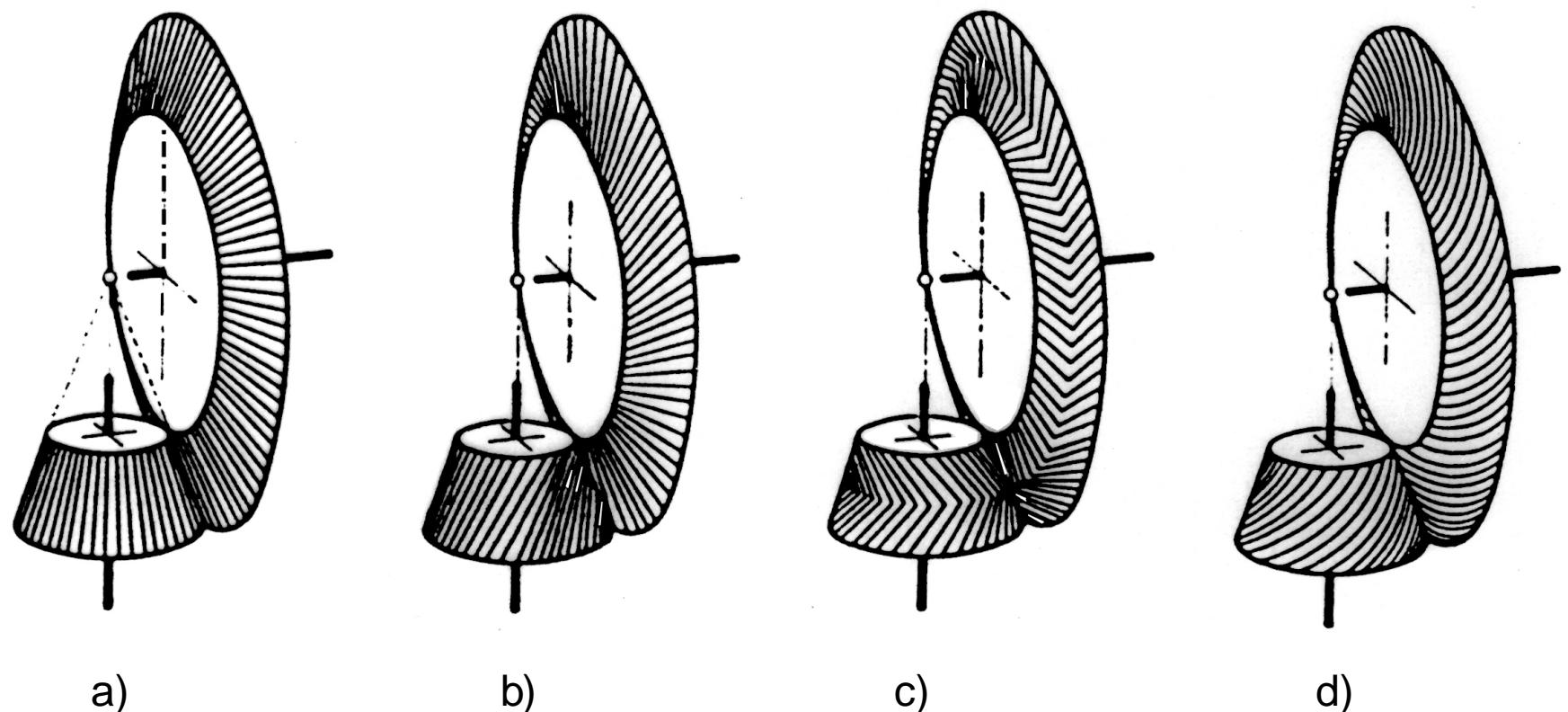


Čelnički zupčasti prijenosi: a) čelnici s vanjskim ozubljenjem, b) čelnici s kosim ozubljenjem, c) čelnici sa strelastim ozubljenjem, d) čelnici s unutrašnjim ozubljenjem

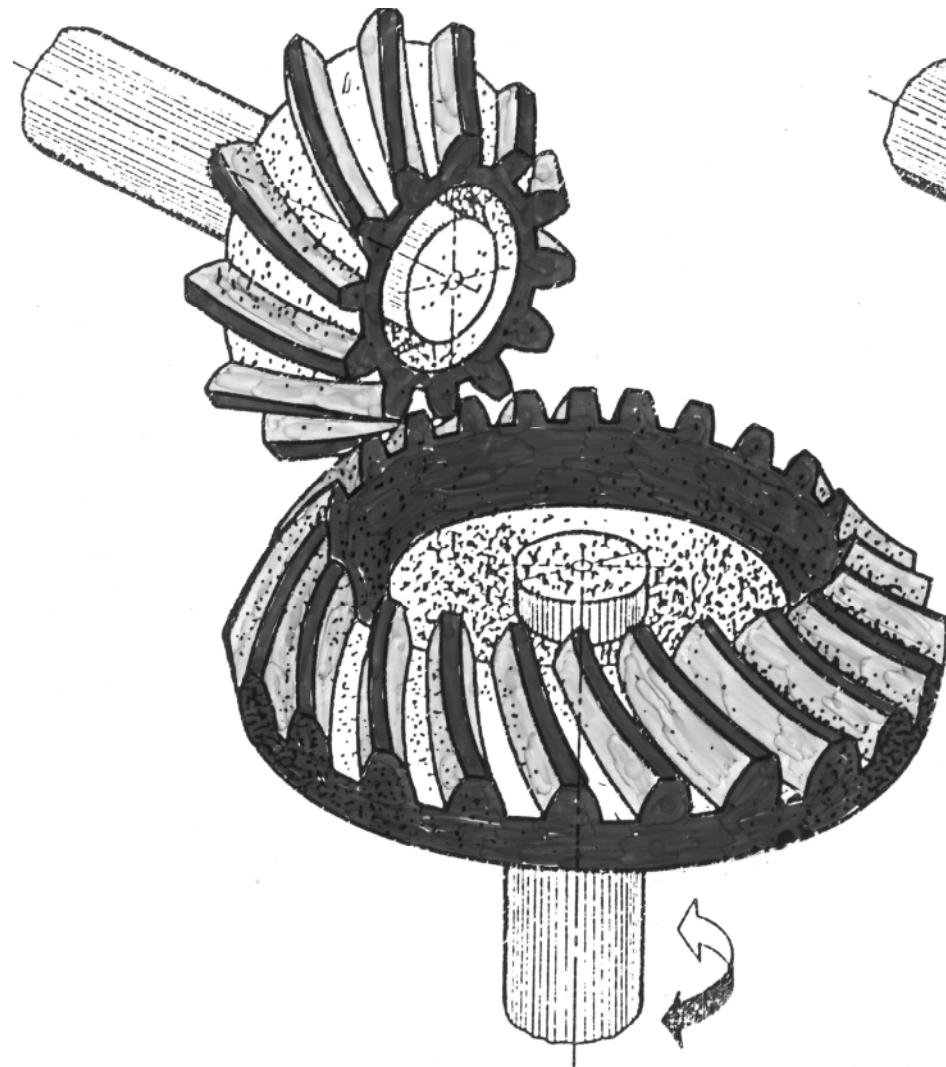


Prijenosnici sa stožnicima

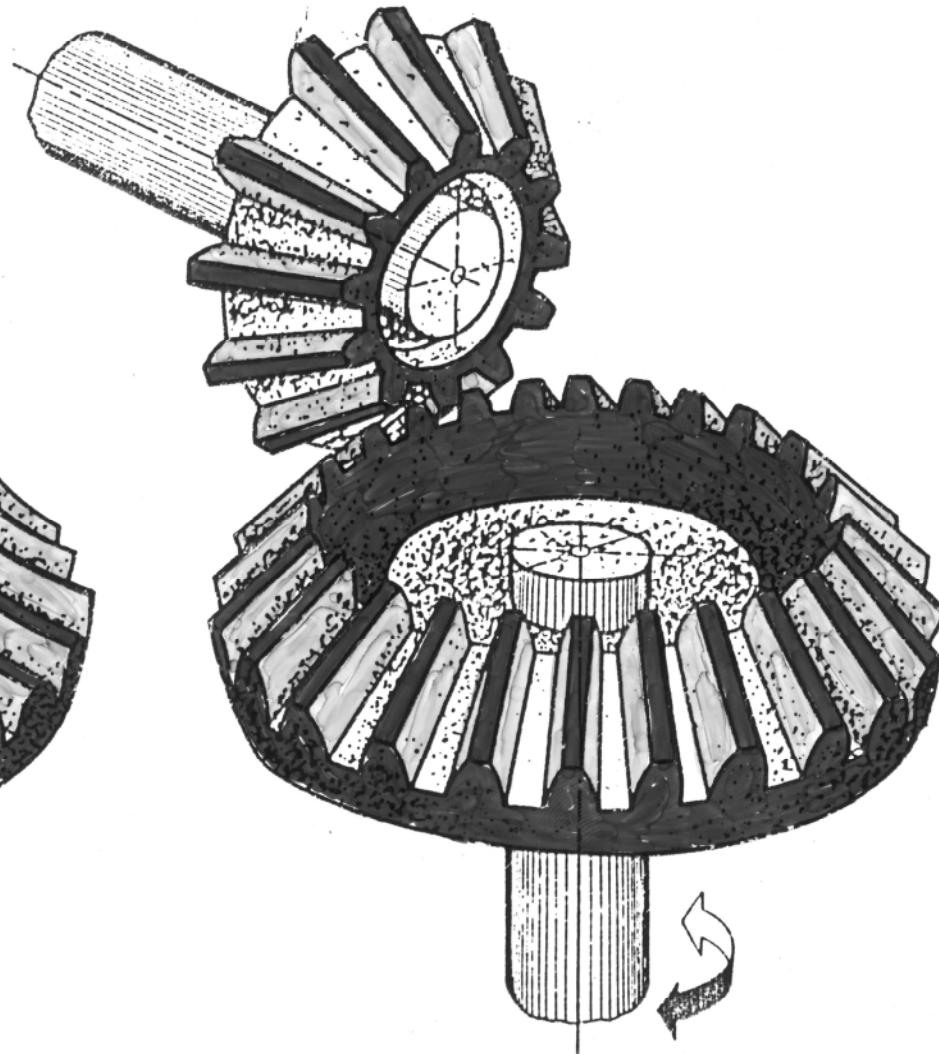
- Izrađuju se s ravnim, kosim i lučnim zubima, primjenjuju se s ukrštenim vratilima za prijenosne omjere do 6 (10).
- Za prijenosne omjere veće od 1.2. prijenosnik s parom stožnika skuplji je od prijenosnika s parom čelnika, a za prijenosni omjer veći od 2,7 skuplji je i od kombiniranog prijenosnika s parom čelnika i parom stožnika. Stoga se rijetko upotrebljavaju za redukciju i množenje okretnog momenta, a češće za promjenu toka snage. U pogledu opteretivosti približno vrijede isti podaci kao kod čeličkog ozubljenja. Za veće zahtjeve ozubljuju se koso i spiralno te termički obrađuju.



Stožnički prijenosi: a) stožnici s ravnim zubima, b) stožnici s kosim zubima
c) stožnici sa strelastim ozubljenjem, d) stožnici sa zakrivljenim zubima (spiralno
ozubljenje)



a)

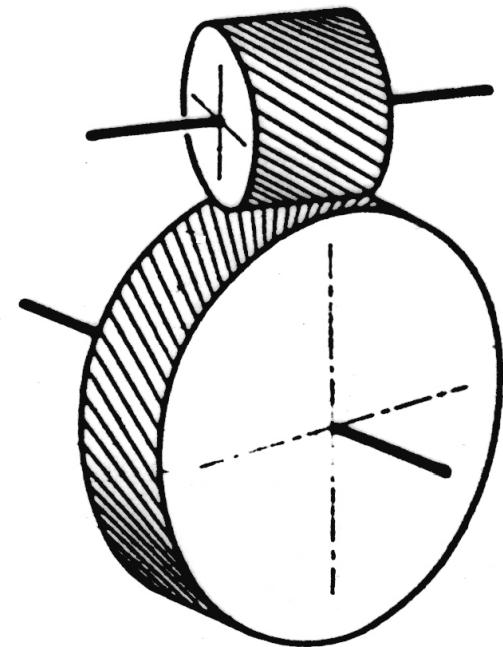


b)

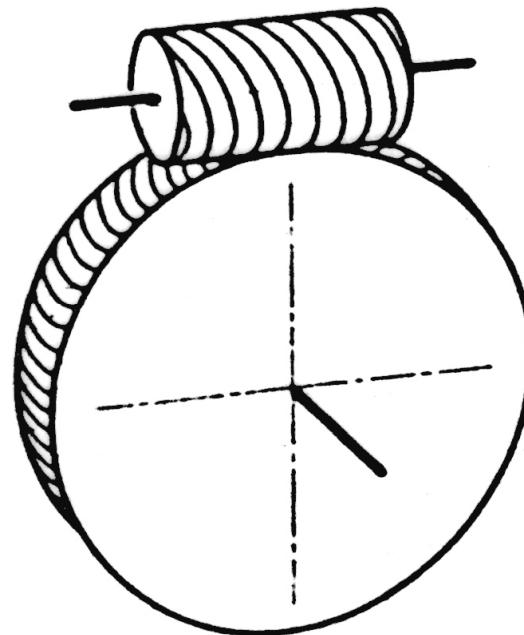
Stožnički prijenosi: a) stožnici sa zakrivljenim zubima b) stožnici s ravnim zubima

Pužni i vijčanički prijenosnici

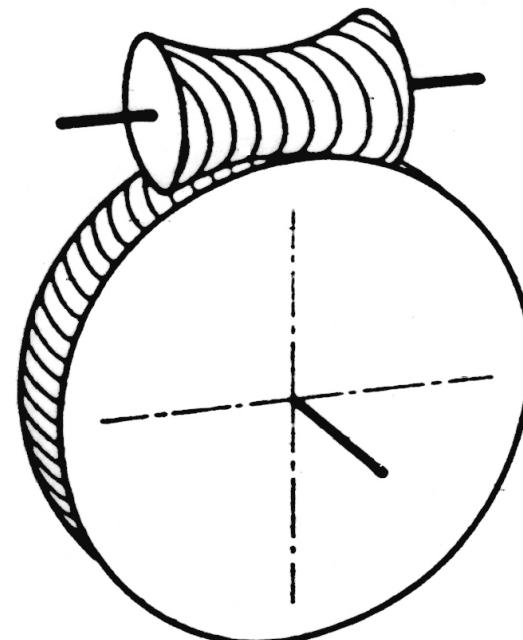
- imaju sposobnost ostvarivanja veoma velikog prijenosnog odnosa u jednom stupnju (i do 100), ali im s porastom prijenosnog odnosa pada stupanj iskorištenja (kod $i = 100$ oko 45%). Za razliku od većine zupčastih prijenosnika, pužni prijenosnici veoma tiho rade a imaju i sposobnost (donekle) prigušenja vibracija
- Za veće prijenosne odnose neke izvedbe dosta su jeftinije od kombiniranih prijenosnika s čelnicima i stožnicima (do $a = 100$ mm). Rade se izvedbe do 1000 kW s izlaznim momentom do 2500 Nm, te do $n_1 = 30\ 000$ 1/min i $v_t = 70$ m/s
- Vijčanički prijenosnici zapravo su prijenosnici s čelnicima s kosim zubima čiji su nagibi bokova istomisleni. Ovo rezultira dodirom u točki i mimosmjernim vratilima. Služe za manja opterećenja i prijenosne odnose ($i = 1$ do 5). Većinom služe kao prijenosnici gibanja, a za manje kutove osi (10 stupnjeva) i kao prijenosnici snage



a)



b)



c)

Vijčanički a) i pužni (cilindrični) b) i globoidni c) prijenos

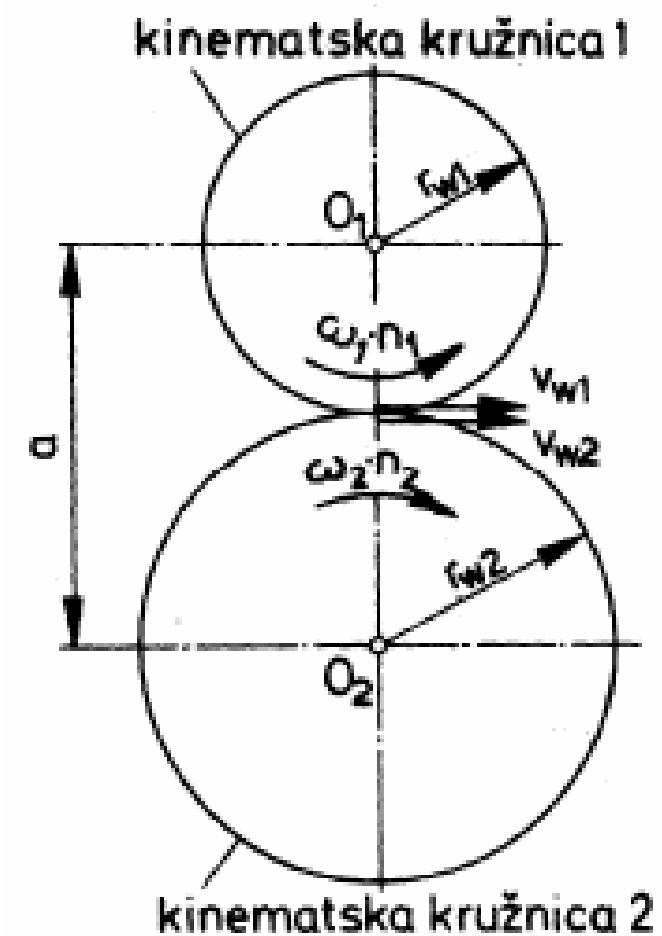
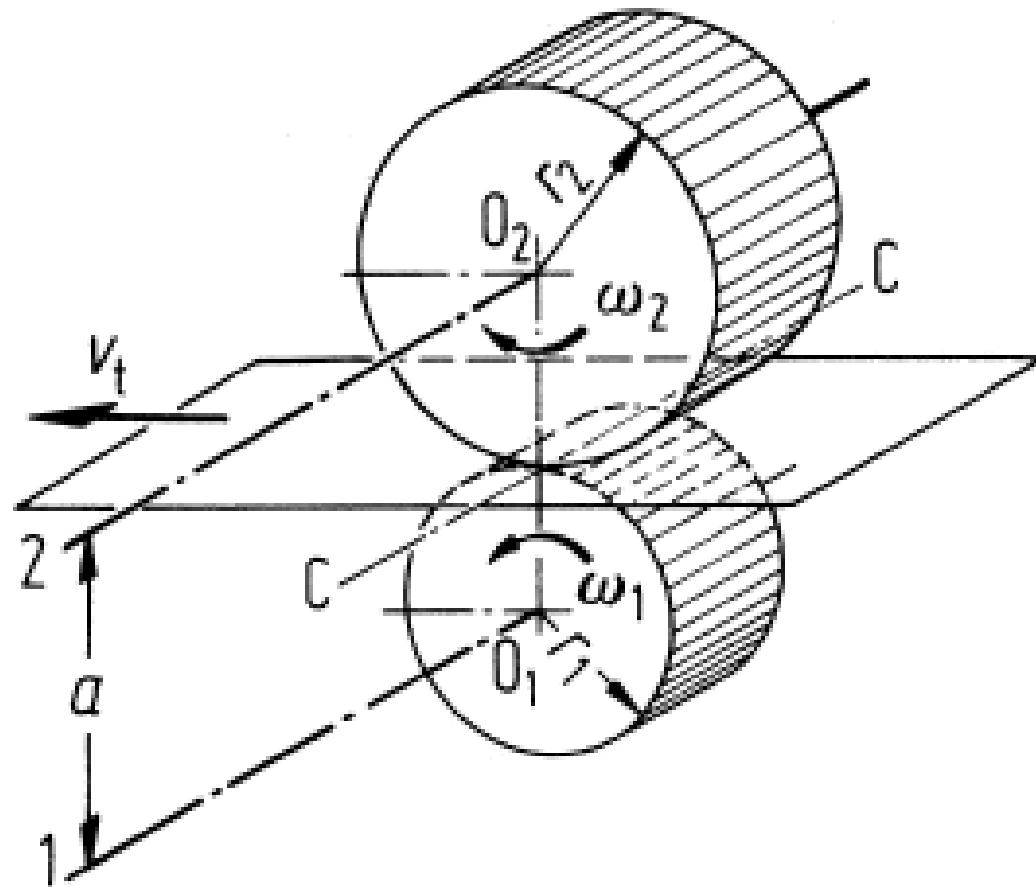
Cilindrični zupčanici (čelnici) s ravnim zubima

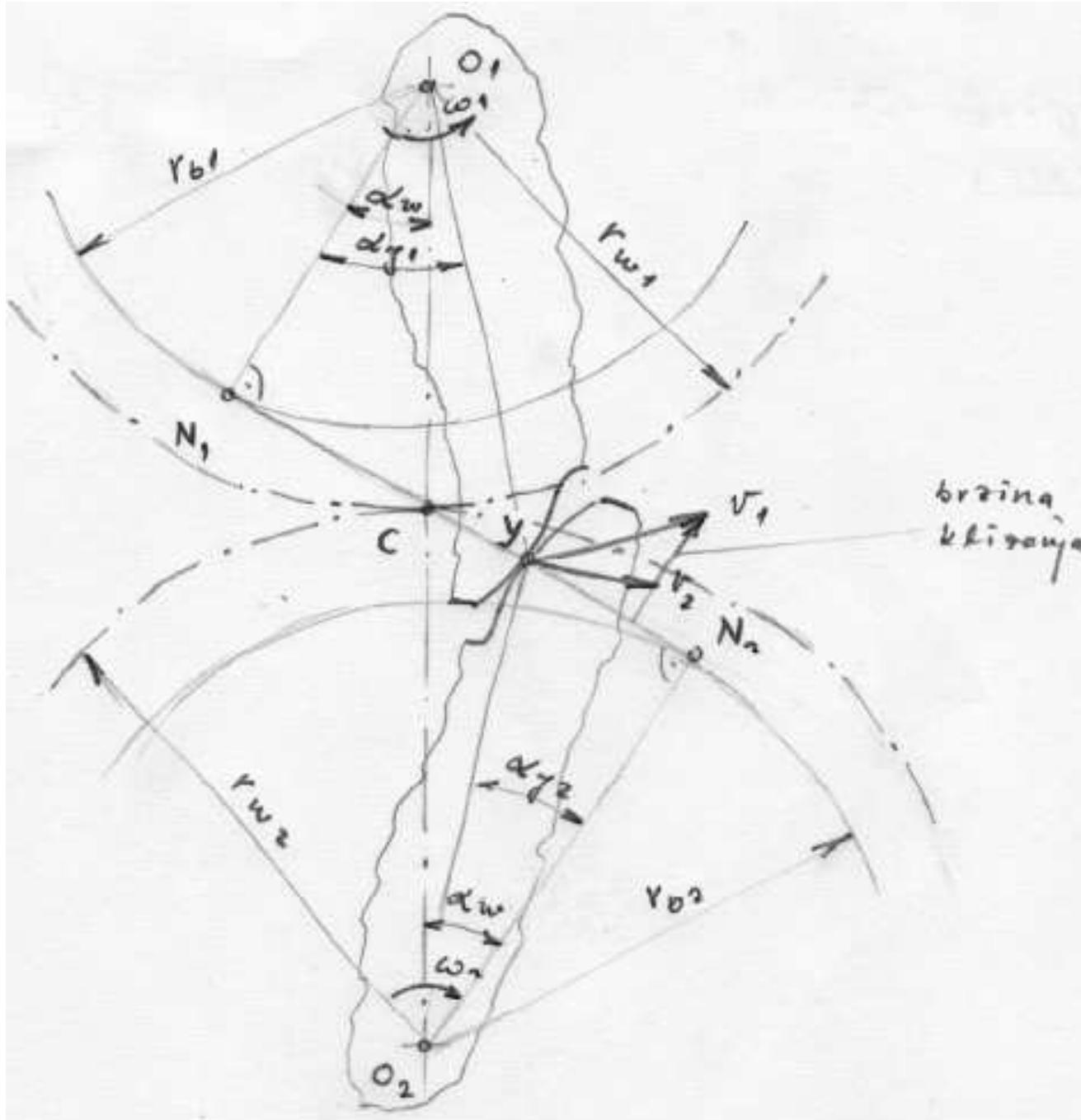
- Da bi se kod para cilindričnih zupčanika ostvario konstantan prijenosni omjer, prijenos gibanja mora biti ostvaren tako kao da su na vratila navučena dva cilindra koji se stalno dodiruju i prenose gibanje bez klizanja. Ovi cilindri se nazivaju kinematski cilindri, a ako ih se presječe okomito na os vrtnje dobivaju se kinematske kružnice.
- Dodirna točka kinematskih kružnica je kinematski pol. Uvjet valjanja bez klizanja može se ostvariti samo uz uvjet jednakih obodnih brzina obaju kinematskih kružnica $v_{w1} = v_{w2}$:

$$v_{w1} = r_{w1}\omega_1 = d_{w1}\pi n_1 \Rightarrow \\ v_{w2} = r_{w2}\omega_2 = d_{w2}\pi n_2$$

- Prijenosni omjer

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_{w2}}{d_{w1}} = \frac{r_{w2}}{r_{w1}}$$





Na slici su prikazan dva profila (tj. boka zuba) koji se odvaljuju jedan po drugome, a istovremeno rotiraju oko svojih centara rotacije O_1 i O_2 . Očito se gibanje sa profila 1 prenosi na profil 2.

ω_1 kutna brzina profila 1,
 ω_2 kutna brzina profila 2.

- U proizvoljnom trenutku, profili se dodiruju i odvaljuju u proizvoljnoj točki Y (trenutna točka dodira). Potrebno je odrediti omjer kutnih brzina obaju profila u ovisnosti o njihovoj geometriji. U tu svrhu, povuku se zajednička
- tangenta t-t i normala n-n u trenutnoj točki dodira. Kutevi $N_1O_1Y \equiv \alpha y_1$ i $N_2O_2Y \equiv \alpha y_2$ nazivaju se kutevima pritiska u točki Y kao točki boka 1 i boka 2.
- **Kut α_w naziva se kut zahvata.** Za vrijeme procesa odvaljivanja, u općem slučaju dok se dodirna točka pomiče po krivulji definiranoj oblikom profila, kutevi αy_2 , αy_1 i α_w , kao i krugovi r_{y1} i r_{y2} , se mijenjaju. Obodne brzine točke Y kao točke profila 1 i 2 su:

$$v_1 = r_{y1} \omega_1 \quad \text{i} \quad v_2 = r_{y2} \omega_2$$

- Vektorska razlika ovih brzina naziva se brzina klizanja spregnutih profila i uvijek je usmjerena u pravcu tangente na profil. Obodne brzine mogu se rastaviti na komponente u smjeru tangente (v_{t1} , v_{t2}) i u smjeru normale (v_{n1} , v_{n2}). Da bi se bokovi neprestano dodirivali moraju komponente v_{n1} i v_{n2} biti međusobno jednake (inače bi se zupčanik z_1 utiskivao u zupčanik z_2 ili bi se od njega odvajao).

- Iz trokuta koji su naznačeni na slici i uvjeta o jednakosti normalnih komponenti obodne brzine proizlazi:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\overline{O_2 N_2}}{\overline{O_1 N_1}}$$

- Iz slike se vidi da zajednička normala n-n siječe međuosnu liniju O₁O₂ u točki C, te iz dva slična trokuta O₁N₁C i O₂N₂C proizlazi

$$\frac{\overline{O_2 N_2}}{\overline{O_1 N_1}} = \frac{\overline{O_2 C}}{\overline{O_1 C}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = i$$

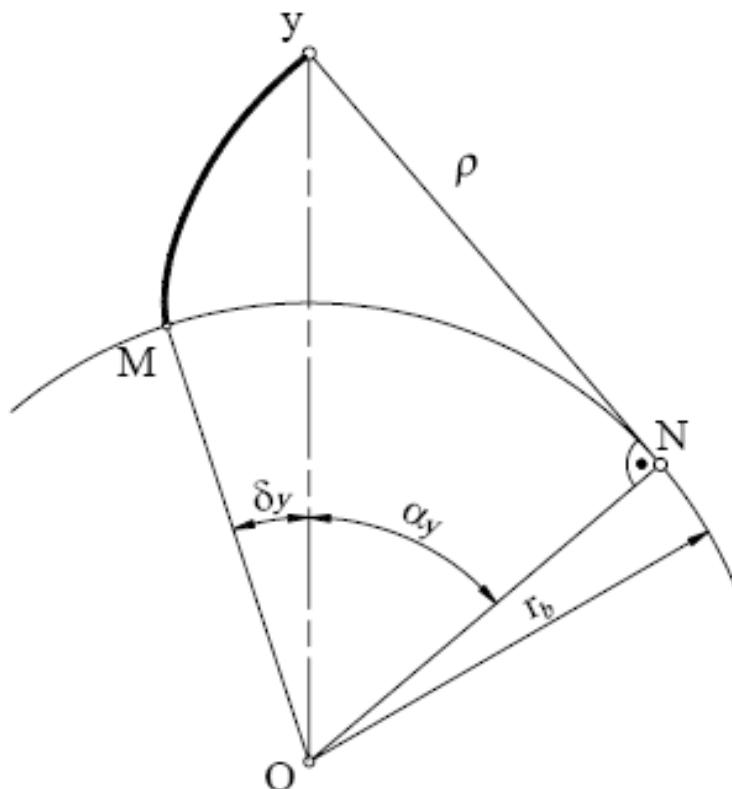
- Konačni analitički izraz glavnog pravila zupčanja se dakle zapisuje kao

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_{w2}}{d_{w1}} = \frac{r_{w2}}{r_{w1}}$$

- tj. kutne brzine odnose se obrnuto proporcionalno s dimenzijama kinematskih krugova.

Evolventno ozubljenje

- Zbog svojih prednosti kao što su relativno jednostavna izrada zupčanika i neosjetljivost prijenosnog omjera na manje promjene osnog razmaka, profil boka zuba zupčanika se najčešće izrađuje u obliku **evolvente**. Evolventa je krivulja koju opisuje svaka točka pravca koji se bez klizanja odvaljuje po osnovnoj kružnici polumjera r_b :



$$\overline{CD} = 2 \cdot r_b \cdot \pi / 2$$

$$\overline{CA_1} = \overline{CB_1}$$

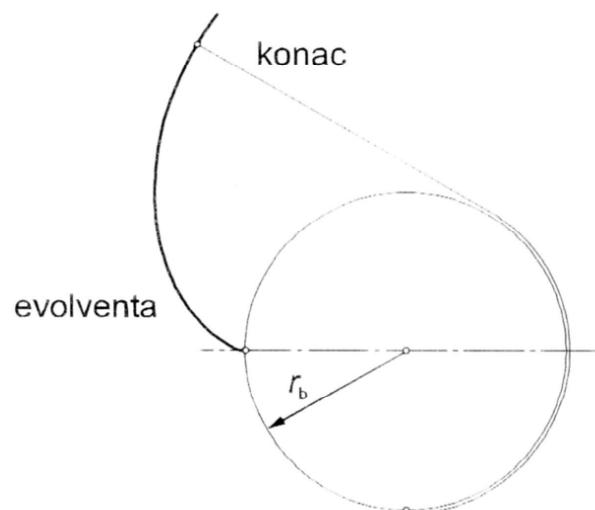
$$\overline{CA_2} = \overline{CB_2} \text{ itd.}$$

$$\overline{B_1C_1} = \text{tangenta u } B_1$$

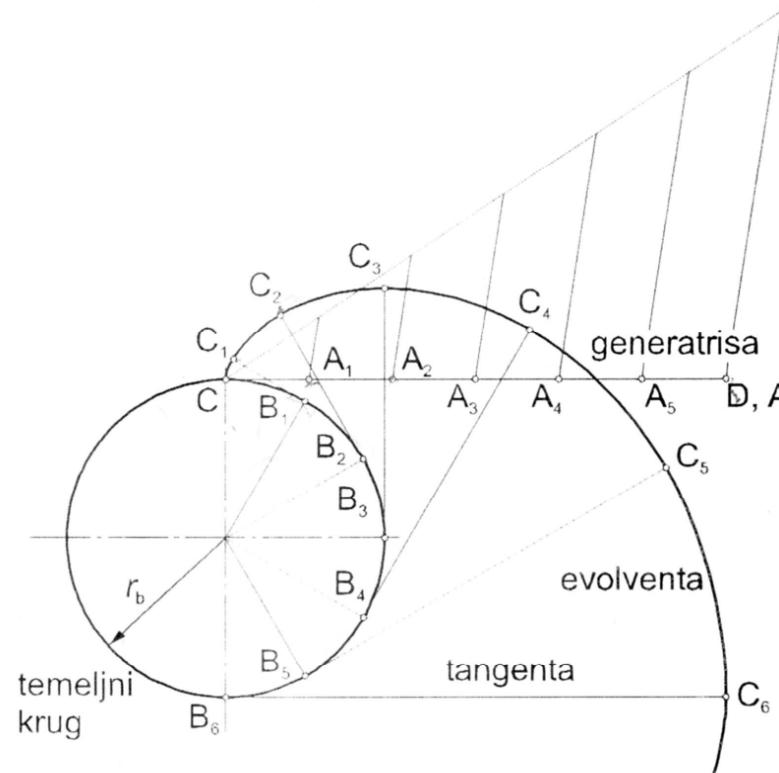
$$\overline{B_2C_2} = \text{tangenta u } B_2 \text{ itd.}$$

$$\overline{CA_1} = \overline{B_1C_1}$$

$$\overline{CA_2} = \overline{B_2C_2} \text{ itd.}$$



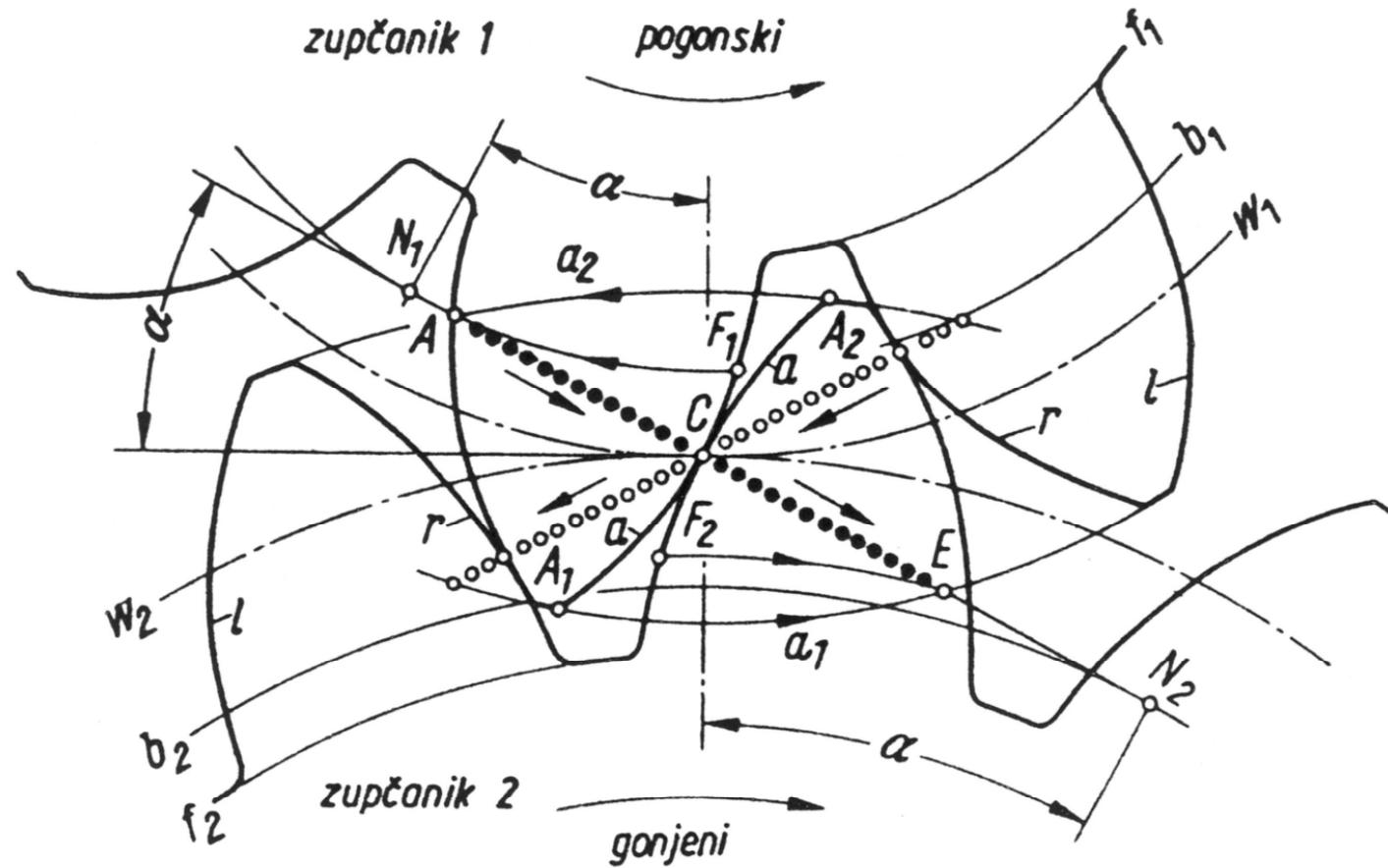
Zahvatna linija – pravac.



- Za evolventni bok zuba normala u svakoj točki dodira tangira isti temeljni krug zupčanika. Budući da svaka od tih normala prolazi i kroz odvalnu točku C, proizlazi da je ona jedna teista i nepomična, bez obzira koja je točka u dodiru. Kako je normala zajednička za oba zupčanika u zahvatu, i nepomična, profil boka zuba spregnutog zupčanika može i mora biti samo evolventan, jer samo kod evolvente normala u proizvoljnoj točki tangira isti (temeljni) krug. Dakle, normala za svo vrijeme zahvata tangira oba temeljna kruga. To znači i da je kut zahvata konstantan, kao i promjeri temeljnih krugova. Očito je također da se zahvat bokova odvija po tom pravcu koji se zato naziva **dodirnica** ili zahvatna linija, a zahvatni kut se naziva još i kut dodirnice. Uočljivo je i da je zahvatni kut ustvari kut pritiska na kinematskom krugu.
- Kinematika evolventnog ozubljenja neosjetljiva je na promjenu osnog razmaka. To slijedi iz izraza $i = r_{b2}/r_{b1} = \text{const.}$ Promjenom a mijenja se zahvatni kut i promjeri kinematskih krugova:

$$\cos \alpha_w = \frac{r_{b1,2}}{r_{w1,2}} = \frac{r_{b1} + r_{b2}}{a}$$

ali temeljni krugovi ostaju nepromijenjeni.

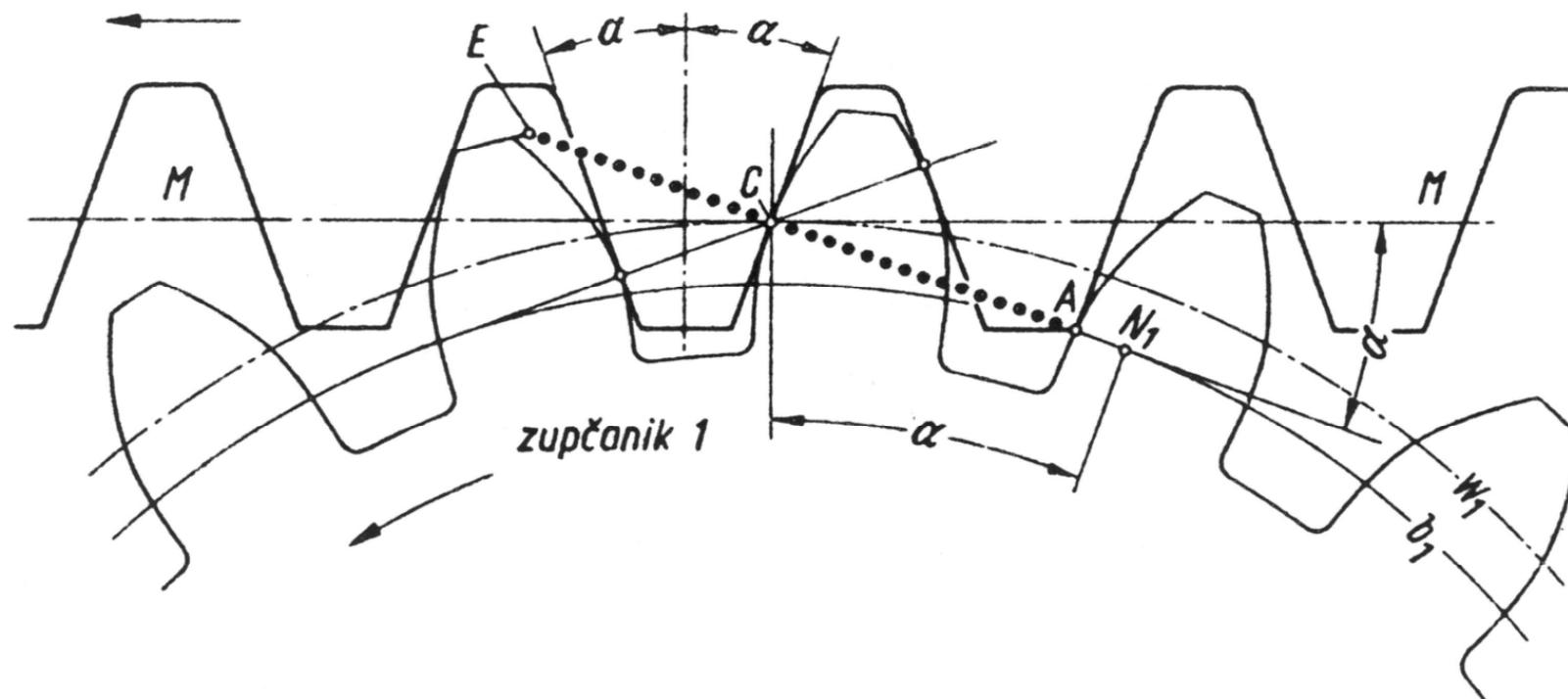


Evolventno ozubljenje u zahvatu

a radni bok; r desni bok; l lijevi bok; w kinematske kružnice; b temeljne kružnice;
 f podnožne kružnice: a tjemene kružnice

Od temeljnih kružnica b do podnožnih kružnica f bokovi se mogu proizvoljno oblikovati. U periodu zahvata od točke A do točke C u dodiru je tjemeni dio boka A_2C zupčanika 2 sa podnožnim dijelom boka F_1C zupčanika 1. U periodu zahvata od točke C do točke E u dodiru je tjemeni dio boka CA_1 zupčanika 1 sa podnožnim dijelom boka CF_2 zupčanika 2.

Kad promjer zupčanika teži beskonačnom, njegov bok zuba postaje pravac. Zato se takav zupčanik, koji se naziva ozubljena letva, bez problema spreže sa svakim evolventnim zupčanikom. Lako je uočiti da je tada kut zahvata jednak kutu nagiba profila ozubljene letve, koji po standardu treba biti jednak kutu osnovnog profila ozubljenja α_n .



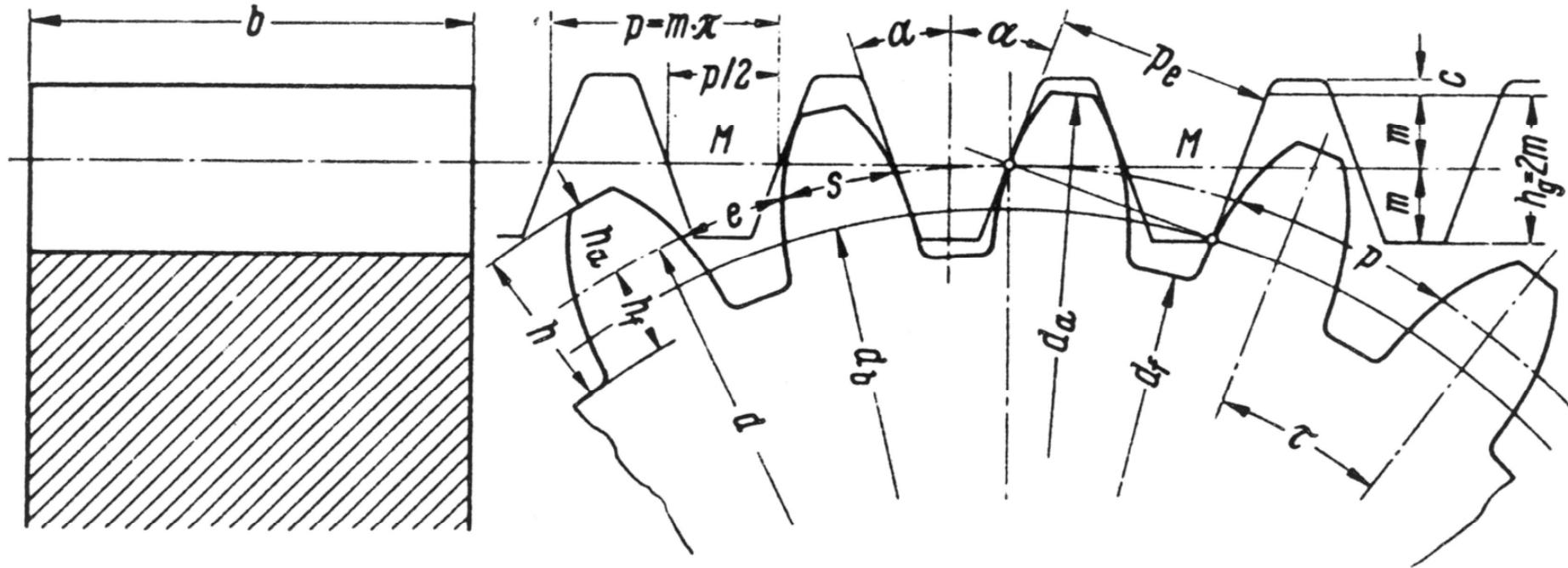
Zupčani par s ravnim i evolventnim bokovima (ozubnica kao standarđan profil)

Karakteristične veličine čelnika s ravnim zubima

- *Frekvencije (brzine) vrtnje obrnuto su proporcionalne promjerima kinematskih kružnica.*
- **p - korak** (ako je bez indeksa onda je to korak na diobenoj kružnici)
- lučna mjera uzastopnih lijevih, odnosno desnih bokova.
- **d – diobeni promjer** – računska veličina, koja se na zupčaniku ne može mjeriti, a definiran je tako da je *opseg diobene kružnice jednak umnošku koraka p i broja zubi z.*
- Ako su diobene i kinematske kružnice jednake, tada su koraci p zupčanika u zahvatu jednaki.

$$\begin{aligned} z_1 p &= d_1 \pi \\ z_2 p &= d_2 \pi \end{aligned} \Rightarrow \frac{z_1}{z_2} = \frac{d_1}{d_2}$$

- **Omjer broja zubi u zahvatu direktno je proporcionalan omjeru promjera zupčanika.**
- **brzine vrtnje zupčanika** odnose se obrnuto proporcionalno prema broju zubi zupčanika
- Zbog pojednostavljenja proračuna i izrade, usvojeno je da je **korak višekratnik broja π**
 $p = m \pi$
- gdje je **m** – modul, čije su vrijednosti standardizirane

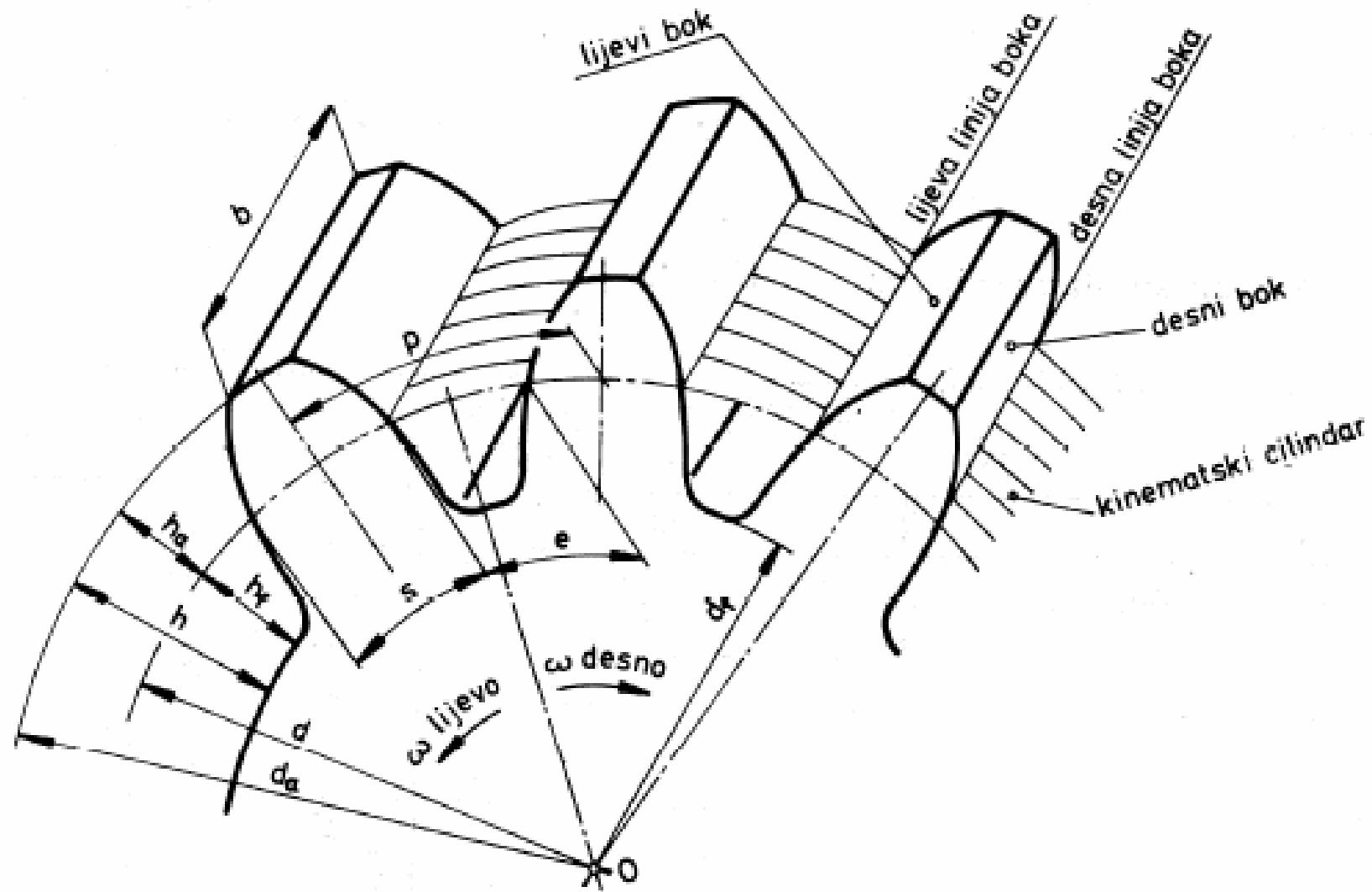


Karakteristične veličine čelnika s ravnim zubima

$$d = \frac{p}{\pi} z = mz$$

$$a = \frac{d_{w1} + d_{w2}}{2} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m(z_1 + z_2)}{2}$$

a – osni razmak – kod zupčanika kome su diobene i kinematske kružnice jednake:



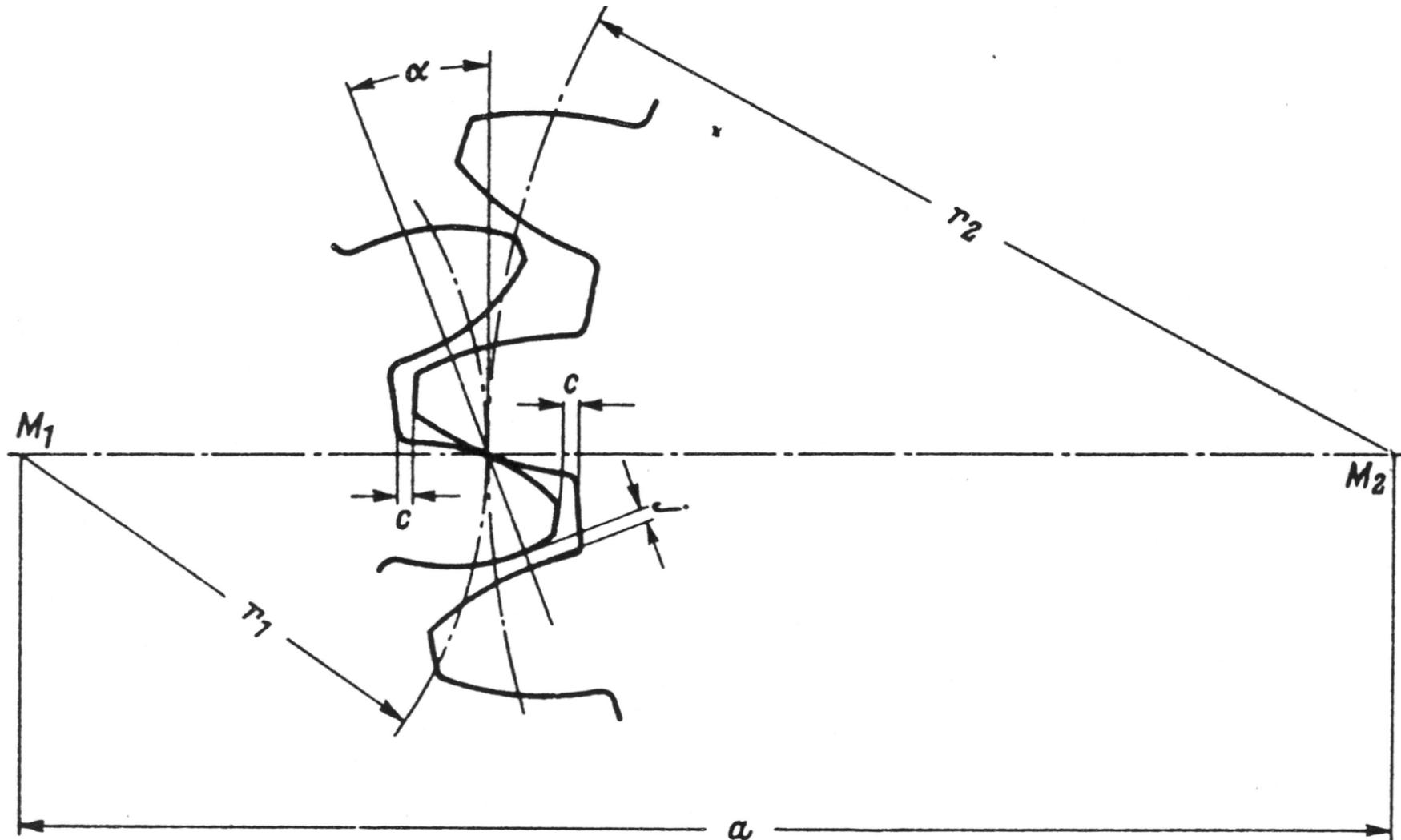
Tablica 124. Standardni moduli u mm prema DIN 780

Red 1	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,25
Red 2	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12	16	20	25	32	40	50	60
	0,055	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,125	1,375
	1,75	2,25	2,75	3,5	4,5	5,5	7	9	11	14	18	22	28	36	45	55	70

Tablica 124a. Standardni moduli u mm prema JUS M.C1.015

Standardni modul u mm								
I	II	III	I	II	III	I	II	III
1				3,5		12		
	1,125		4		3,75		14	
1,25				4,5		16	16	
	1,375		5				18	
1,5				5,5		20		
	1,75		6		6,5		22	
2				7		25		
	2,25		8				28	
2,5				9		32		
	2,75		10				36	
3		3,25		11		40		

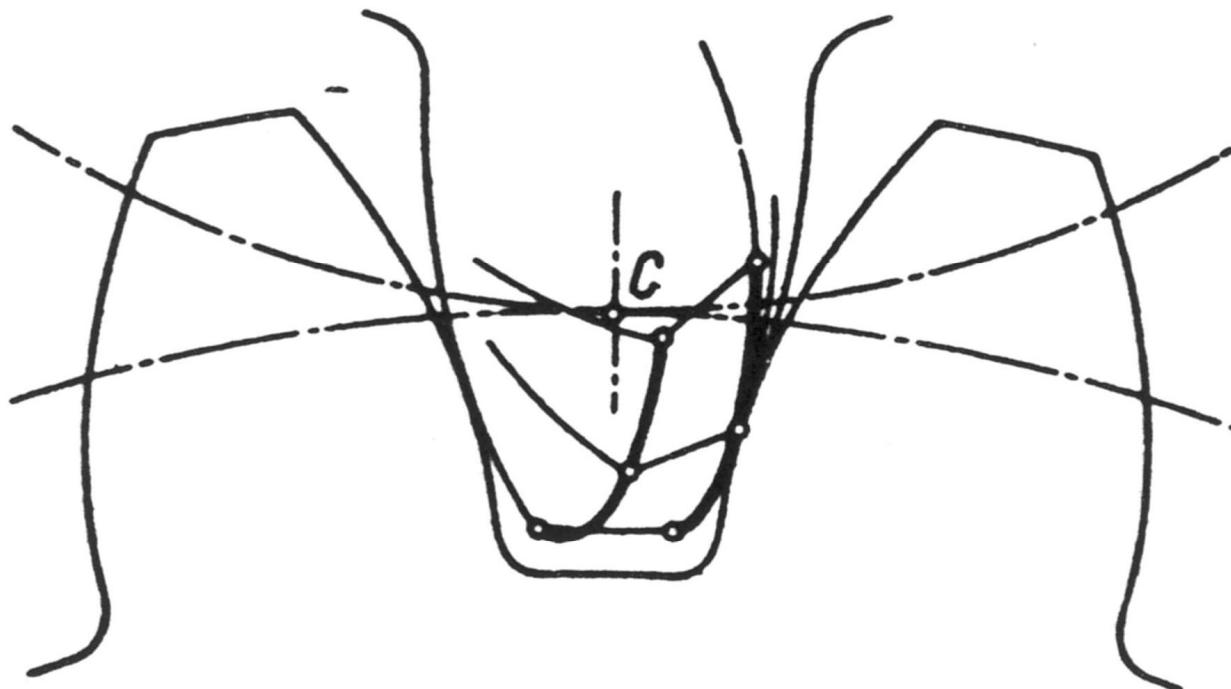
Iz proizvodnih razloga moraju za osne razmake biti predviđene tolerancije međusobnog osnog razmaka. Također zbog pravilne funkcije mora između onih bokova koji se prenosi gibanje postojati bočna zračnost j .



Zračnost, razmak osi

Granični broj zuba nultih čelnika s ravnim zubima

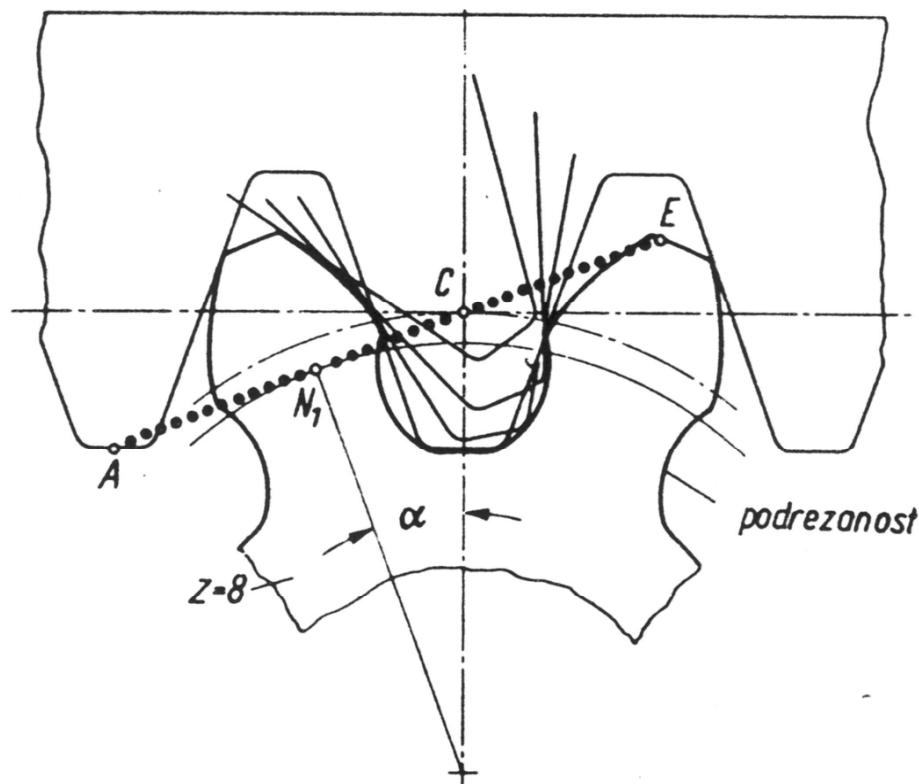
- Vršna točka na tjemenu zuba zupčanika koji kruži opisuje *relativnu putanju vrha zuba u uzubini zupčanika koji stoji*. Od temeljnih kružnica b do podnožnih kružnica f bokovi se mogu proizvoljno oblikovati. Tako oblikovani prijelazni radjus ne smije presijecati relativnu putanju vršne točke zuba. Radi zareznoga djelovanja treba prijelazni radjus biti što veći.



Relativne putanje vršnih točaka zuba

Granični broj zuba nultih čelnika s ravnim zubima

- Od temeljnih kružnica b do podnožnih kružnica f bokovi se mogu proizvoljno oblikovati. Tako oblikovani prijelazni radjus ne smije presijecati relativnu putanju vršne točke zuba. Radi zareznoga djelovanja treba prijelazni radjus biti što veći. Ukoliko bi točke dodira A ili E pale izvan točaka N_1 i N_2 , u kojima zahvatna linija tangira temeljne kružnice, putanja vrha glave velikoga zupčanika presjecala bi dio aktivnog dijela podnožja boka maloga zupčanika u blizini temelne kružnice. Ova se pojava naziva **podrezivanje**.



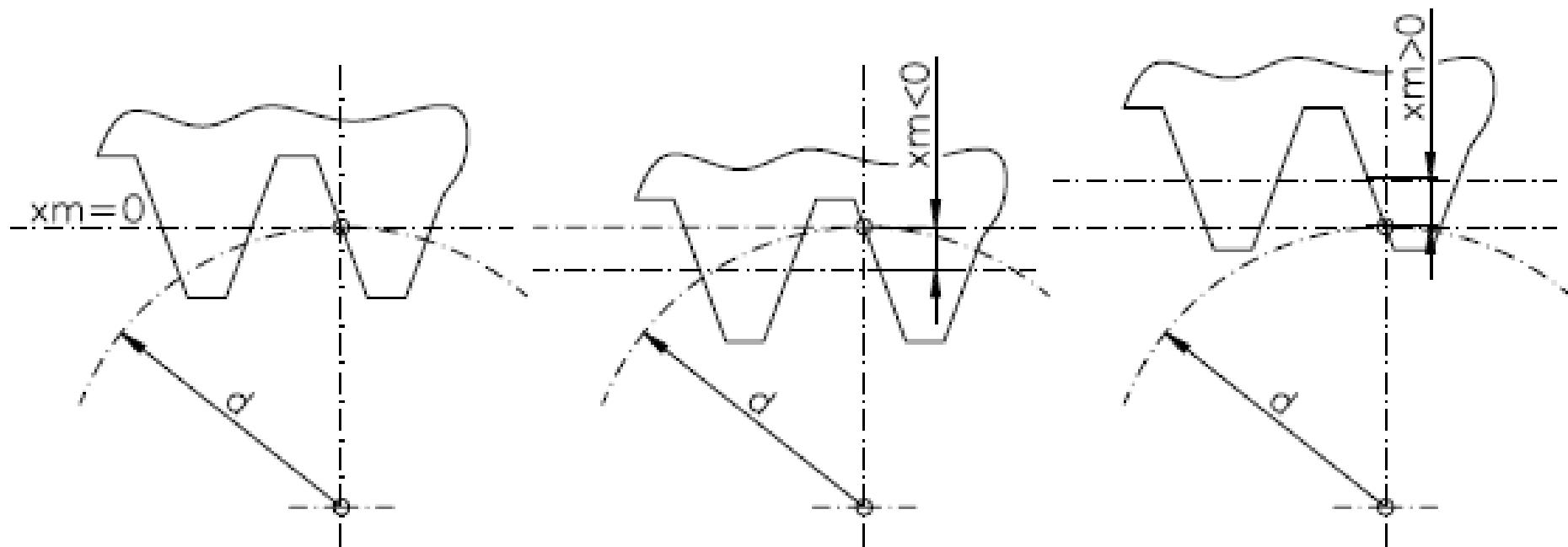
Nastajanje podrezanosti kod evolventnog ozubljenja

Granični broj zuba nultih čelnika s ravnim zubima

- Podrezanost se može smanjiti povećanjem broja zuba malog zupčanika.
- Teoretski, granični broj zuba za zupčaniprijenosnik s ozubnicom, koji općenito označavamo kao minimalni broj zuba **NULTOG** vanjskog ozubljenja iznosi
- $z_g = 2/\sin^2\alpha$ kod $\alpha = 20^\circ$ $z_g = 17$
- Praktički se dopušta mala podrezanost, pa se kod $\alpha = 20^\circ$ računa sa $z_g = 14$.

Pomak profila

- ukoliko je pri izradi zupčanika zupčana letva postavljena tako da njen diobeni pravac ne tangira diobeni krug zupčanika dobivaju se zupčanici s pomakom profila. Pomak profila, koji se definira kao umnožak faktora pomaka profila (x) i modula (m) može biti pozitivan ili negativan.



Pomak profila

- Pomak profila ne utječe na promjer diobenog i temeljnog kruga: jer je promjer diobenog kruga $d = mz$, a promjer temeljnog kruga $d_b = d \cos \alpha_n$
- Promjeri krugova preko glave i korijena se s povećavanjem pomaka profila povećavaju: jer je promjer preko glave:

$$d_g = d + 2(1+x)m$$

- promjer preko korijena $d_f = d - 2m(1,25-x)$
- Debljina zuba na diobenom krugu s povećanjem pomaka profila se povećava jer je debljina zuba na diobenom krugu jednaka

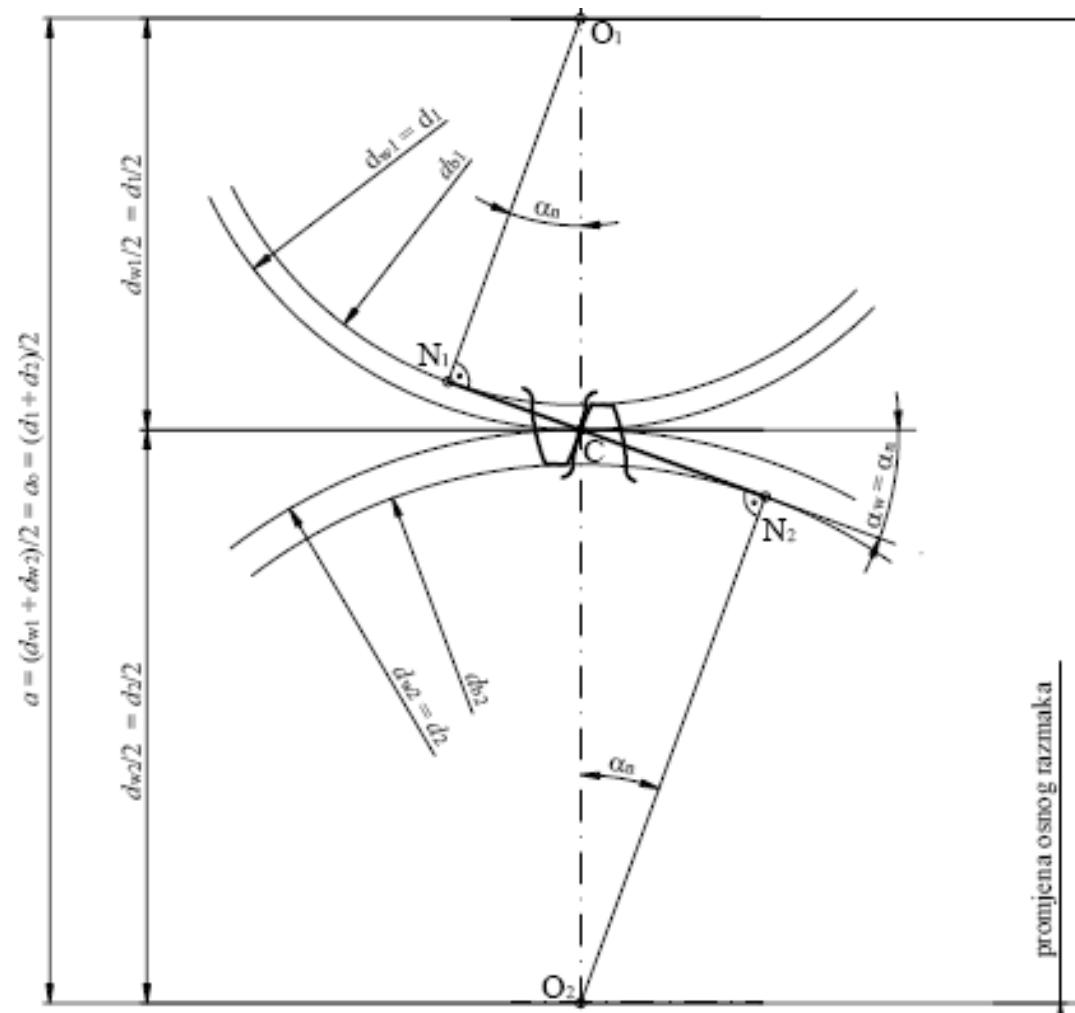
$$s = \frac{m\pi}{2} + 2x \tan \alpha_n$$

Pomak profila

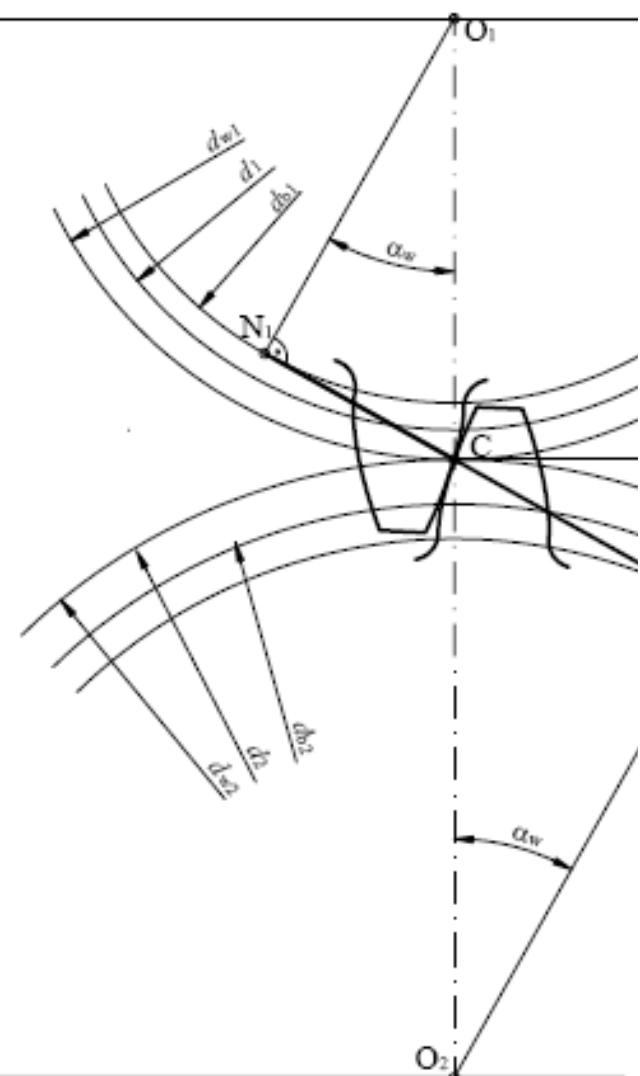
- Pomak profila bitno utječe na podrezivanje korijena zuba:
- Ako je broj zubi zupčanika malen, alat ulazi u podnožje zuba, podrezuje ga i slabi. Kod zupčanika bez pomaka profila granični broj zubi - broj zubi kod kojeg još ne dolazi do podrezanosti korijena zuba je $z = 17$, odnosno praktično se može dopustiti mala podrezanost korijena pa je praktični granični broj zubi $z = 14$. Udaljavanjem alata od zupčanika, odnosno povećavanjem pomaka profila smanjuje se opasnost od podrezivanja, na taj način mogu se izraditi zupčanici s brojem zubi manjim od 14, a da kod njih ne dolazi do podrezivanja, odnosno slabljenja zuba u korijenu.
- Pomak profila ne mijenja korak osnovnog profila, ni korak na diobenom krugu zupčanika pa proizlazi da se zupčanici s različitim pomacima profila mogu međusobno pravilno sprezati.
- Zupčanici s pomakom profila se izvode radi sljedećih razloga:
 - Mogućnost postizavanja standardnog osnog razmaka
 - Mogućnost izrade zupčanika s manjim brojem zubi bez pojave podrezivanja
 - Postizavanja boljih svojstava ozubljenja: npr. povećanje opteretivosti korijena i bokova zubi, povećanje stupnja prekrivanja, poboljšavanje uvjeta klizanja, izbjegavanje zašiljenosti zuba

Sparivanje zupčanika

- Zupčani parovi mogu biti:
 - a) Nula par - oba zupčanika se izvode bez pomaka profila
 - b) V-nula par – suma faktora pomaka profila jednaka nuli
 - c) V-par – suma faktora pomaka profila različita od nule
 - c₁) V-plus par - suma faktora pomaka profila veća od nule
 - c₂) V-minus par - suma faktora pomaka profila manja od nule
- Kada se radi o nula paru zupčanika, odnosno o paru zupčanika kod kojih su faktori pomaka profila jednakim nulama $x_1 = x_2 = 0$, odnosno o V-nula paru zupčanika, kod kojih je suma faktora pomaka profila jednaka nuli $\sum x = x_1 + x_2 = 0$, tada se u kinematskom polu dodiruju diobeni promjeri.
- Na slici su prikazane promjene do kojih dolazi povećanjem osnog razmaka. temeljni i diobeni promjeri ostaju isti, te su na taj način dobivene iste evolvente i nepromijenjen prijenosni omjer, a kinematski promjeri, i kut zahvatne linije se mijenjaju.



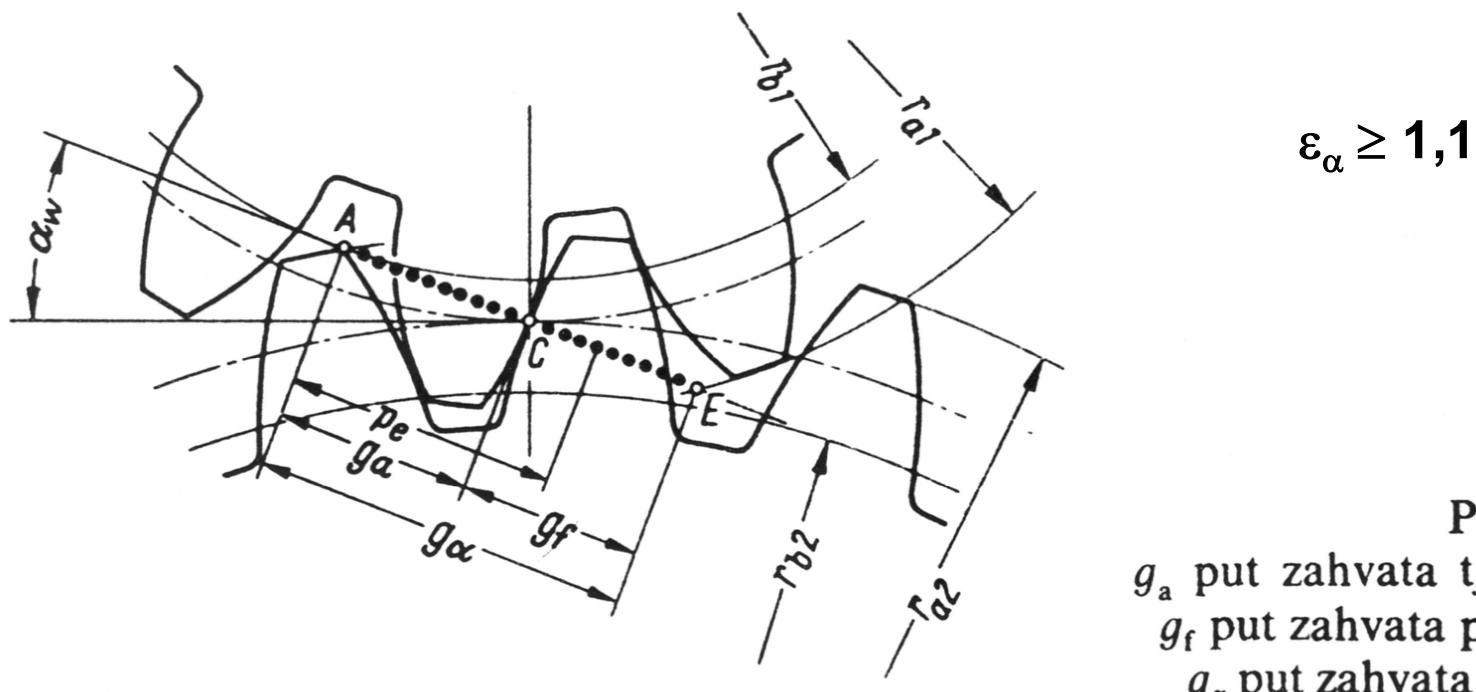
a) Nula par ($x_1 = x_2 = 0$) i V-nula par
 $(\sum x = x_1 + x_2 = 0)$



b) V-plus par ($\sum x = x_1 + x_2 > 0$)

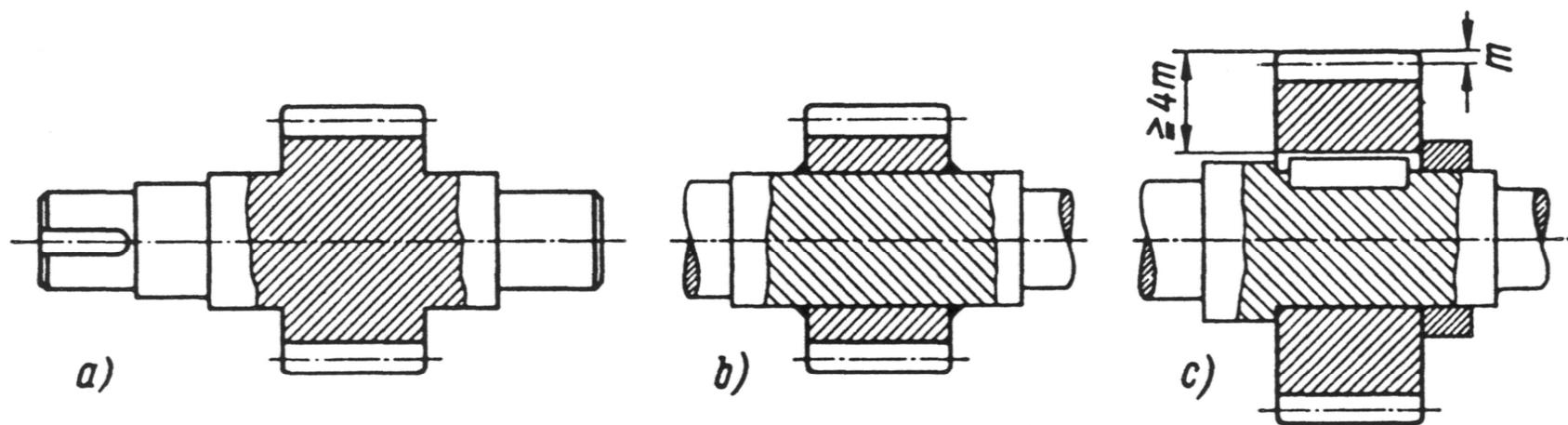
Stupanj prekrivanja

- Zahvat traje od točke A do točke E u kojima se sijeku krugovi preko glava. U trenutku kada Zub Zupčanika 2 uđe u zahvat (u točki A) s točkom boka zuba Zupčanika 1 koja se nalazi na promjeru točke A, prethodni par zubi se dodiruje u točki zahvatne linije koja je za korak temeljnog kruga udaljena od tačke A. Dakle, tada su dva para zubi u zahvatu. To traje sve dote dok spomenuti prethodni par zubi ne izade iz zahvata u točki E.



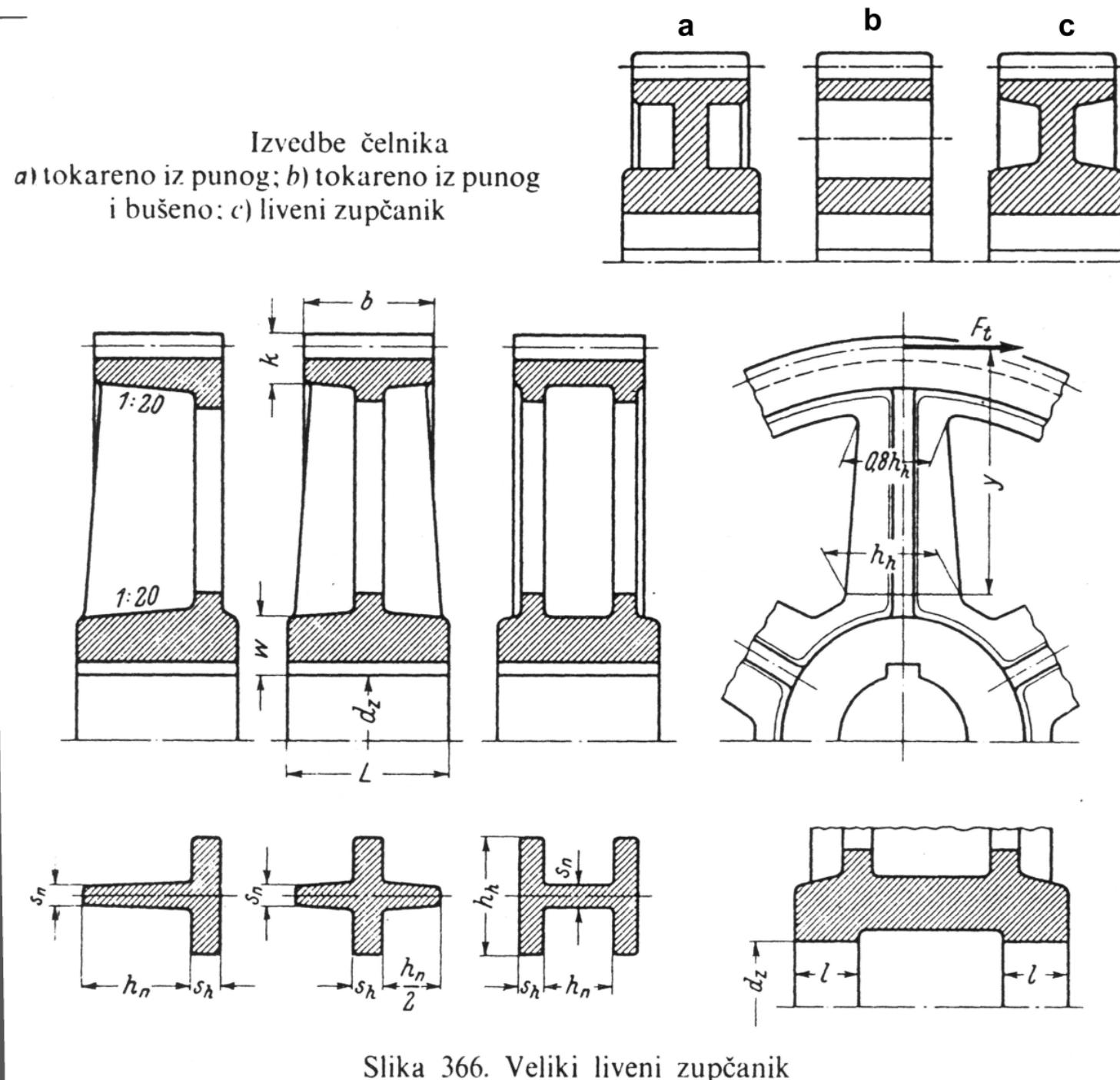
Prekrivanje profila
 g_a put zahvata tjemena zupčanika 2;
 g_f put zahvata podnožja zupčanika;
 g_α put zahvata (dodirnica profila)

Oblikovanje čelnika

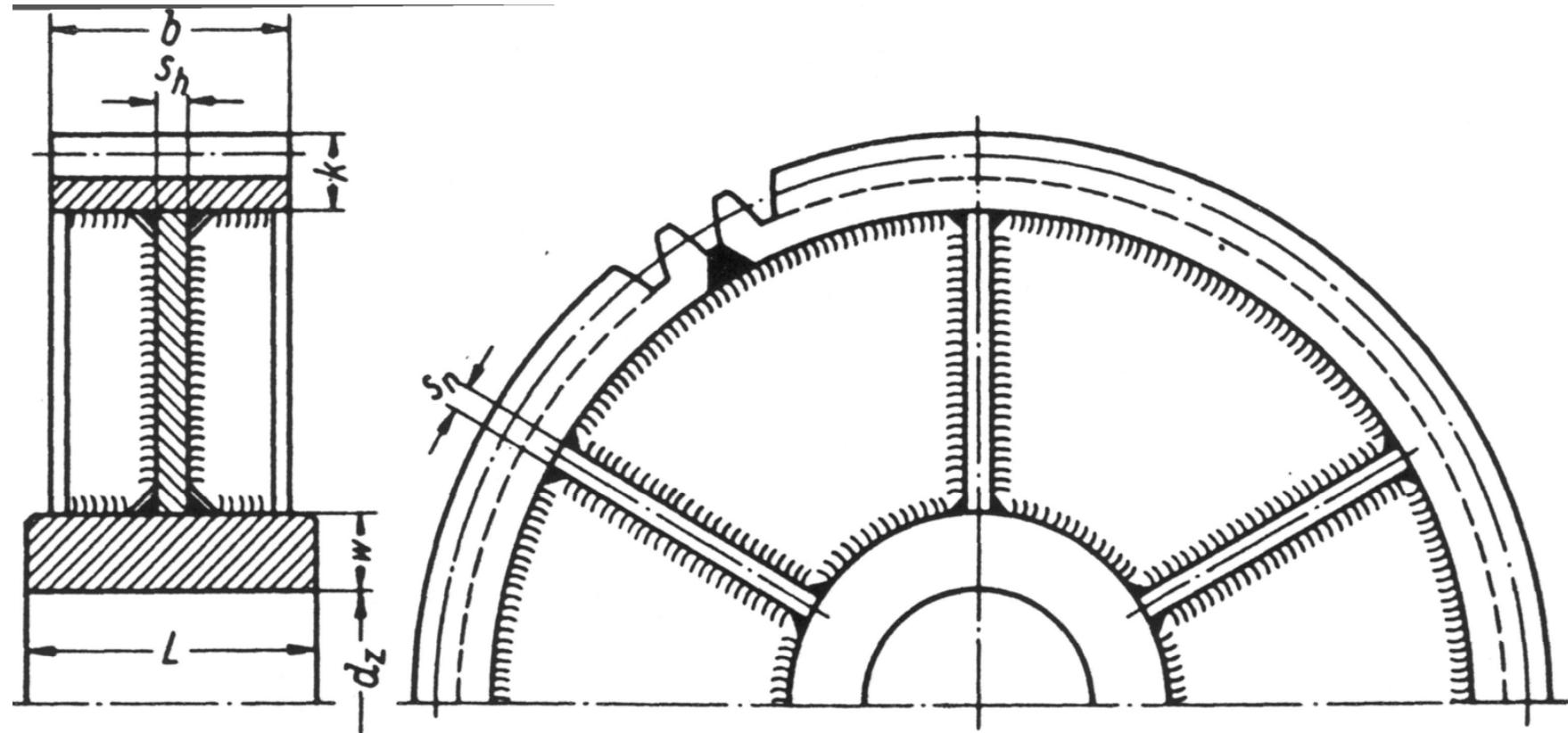


Oblikovanje malih (pogonskih) zupčanika

a) mali zupčanik i vratilo od jednog dijela; b) vijenac zavaren na vratilo; c) mali zupčanik naklinjen na vratilo pomoću pera

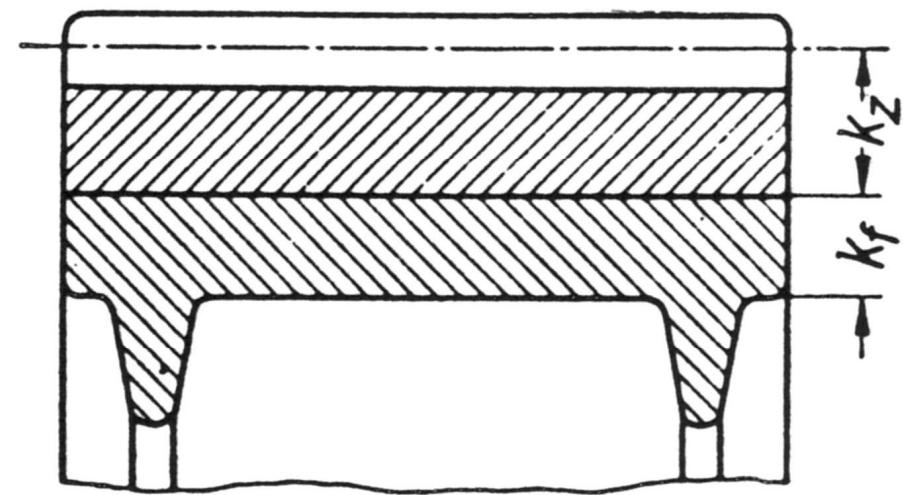


Slika 366. Veliki liveni zupčanik



Zavarení zupčanik

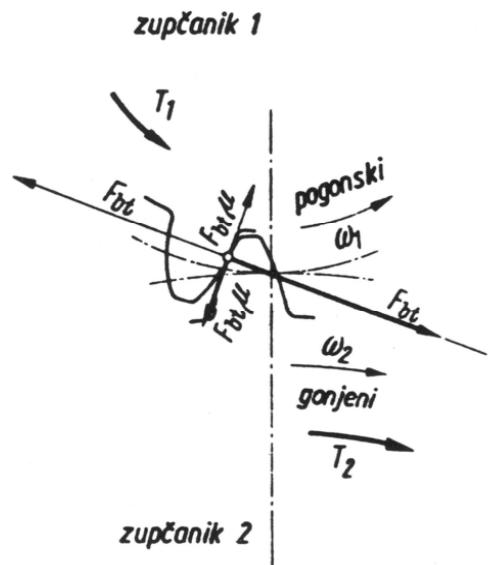
Na livenu glavinu naprešani
vijenac



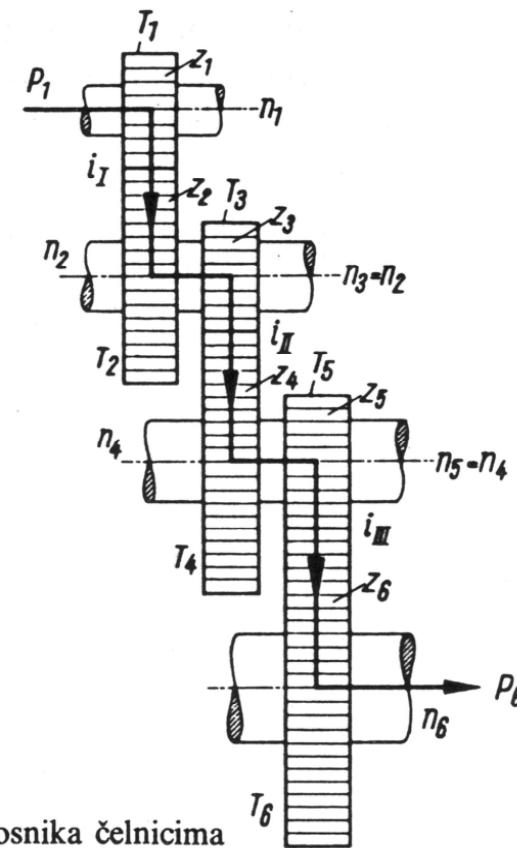
Trenje, iskoristivost, prijenosi

Pogonski zupčanik tlači na bok gonjenoga zupčanika. Normalna sila F_{bt} djeluje u svakoj točki dodira okomito na tangente točaka dodira, u smjeru zajedničke normale. Sila F_{bt} stvara na bokovima silu trenja $F_{bt} \cdot \mu$.

Odvedena snaga zupčanika 2 iznosi $P_2 = M_{t2} \cdot \omega_2$. Da bi se omogućilo odvođenje ove snage, potrebno je zupčaniku 1 dovesti veću pogonsku snagu $P_1 = Mt_1 \cdot \omega_1$. Ta veća snaga potrebna je da bi se svladalo trenje, čime se jedan dio dovedene snage gubi. **Bez trenja $P_2 = P_1$.**



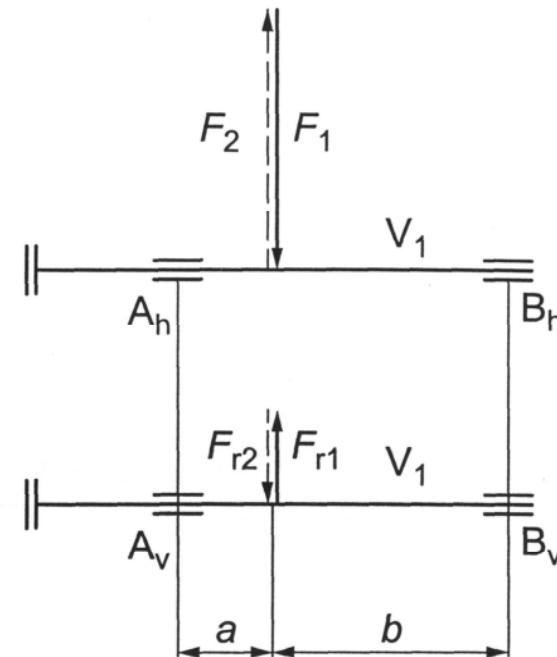
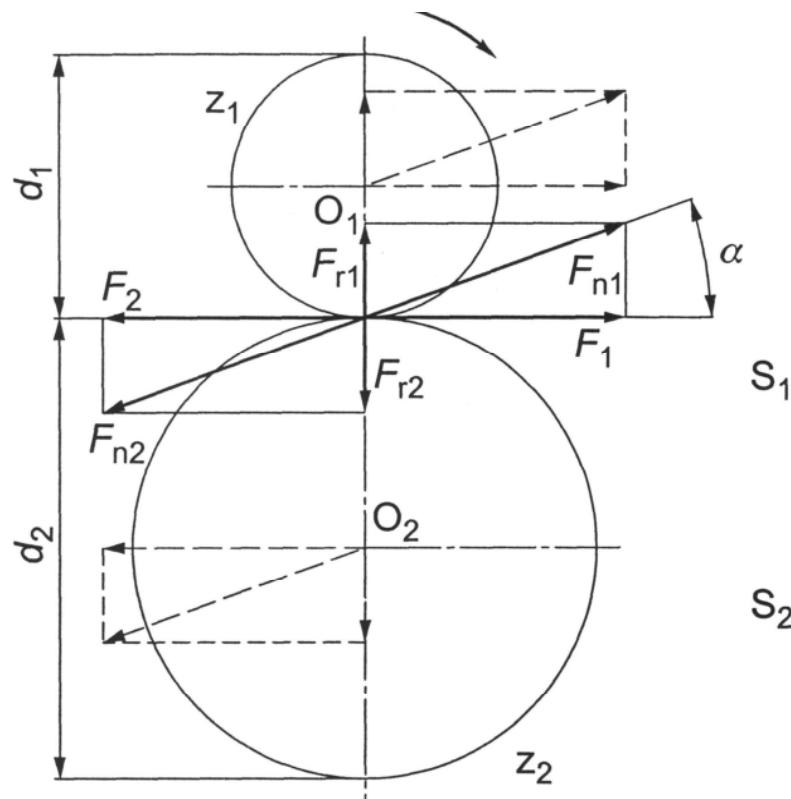
Prijenos sila zupčanog para



Shema trostepenog prijenosnika čelnicima

Sile na čelnicima s ravnim zubima

- Normalna sila na zub F_n djeluje u smjeru zahvatne linije u kinematskom polu C.



Dispozicija sila u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini

Sile na čelnicima s ravnim zubima

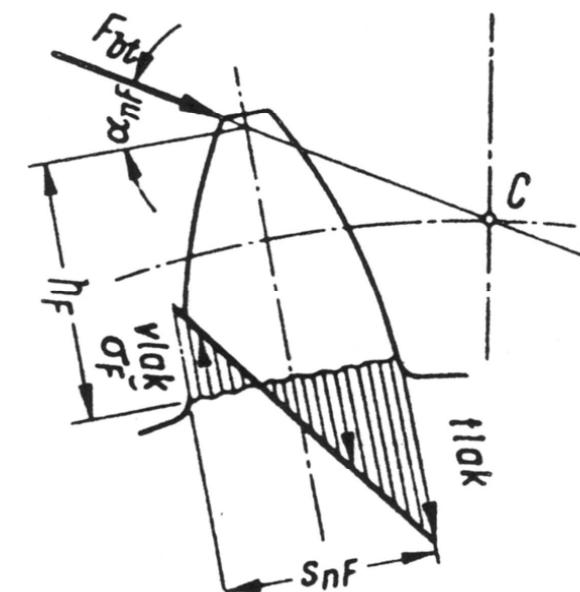
- Normalna sila se rastavlja na obodnu i radijalnu komponentu. Obodna sila se računa iz okretnog momenta koji se prenosi:
- $F_1 = 2M_{t1}/d_1$ gdje je $M_{t1} = P/\omega_1$
- Iz slike je vidljivo da je radijalna sila: $F_r = F_1 \tan \alpha$
- Po zakonu akcije i reakcije slijedi:
- $F_{r1} = F_{r2}$
- $F_{n1} = F_{n2}$
- $F_1 = F_2$
- Ove sile moraju prenijeti vratila i ležajevi.

Nosivost korijena

- Sila F_{bt} koja se prenosi zubima s hvatištem koje se pomiče, ovisno o trenutnoj točki dodira zupčanog para, opterećuje zube na savijanje. Najveće naprezanje u korijenu zuba nastaje onda kada sila djeluje na tjemenu zuba i kad se u zahvatu nalazi samo jedan par zubi. **Tlačno naprezanje** od savijanja je veće nego vlačno. Ipak naprezanje na vlak od savijanja je mjerodavno za lom zuba. Sobzirom da je zub za vrijeme jednoga okretaja samo kraće vrijeme stvarno opterećen, ovdje se radi o **titrajnom opterećenju** koje može dovesti do loma zbog umornost.

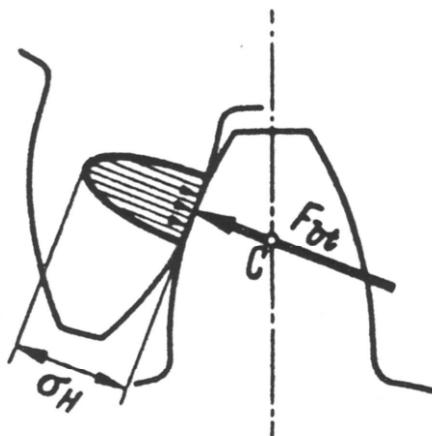
Samo ako su promjene smjera vrtnje česte, ili ako se radi o međuzupčanicima koji su istodobno u zahvatu sa dva zupčanika, od kojih je jedan pogonski, a drugi gonjeni korijen zuba je opterećen **izmjenično promjenjivo**.

Savojno napreza-
nje u korijenu zuba

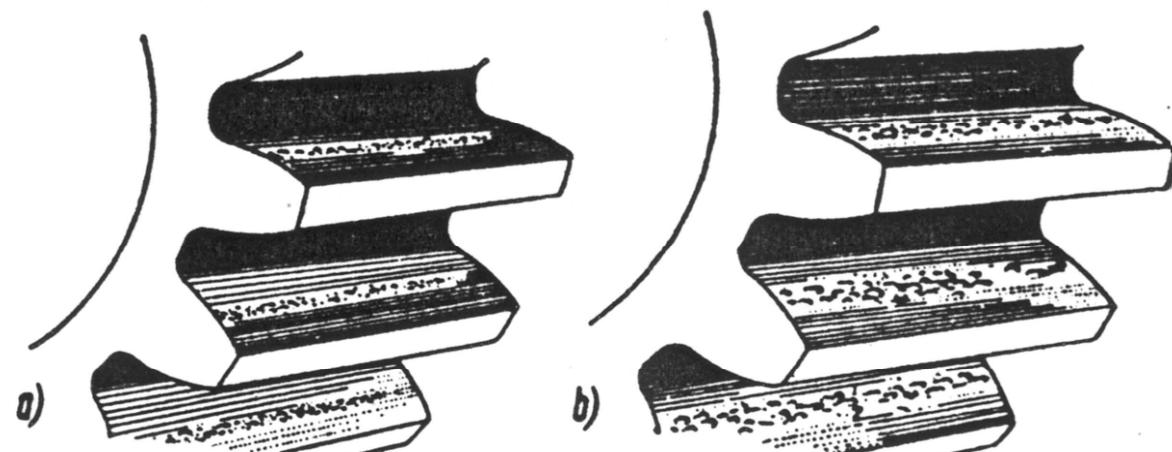


Nosivost bokova zubi

- Pri prijenosu snage bokovi zubi se međusobno relativno gibaju. Pri ovom gibanju dolazi do pojave kontaktnog (Hertzovog) pritiska na dodirnim površinama. Zbog ovog pritiska, ovisno o stanju hrapavosti površine, te o čvrstoći bokova, kapljice maziva bivaju utisnute u mikropukotine
- i dolazi do razaranja površine. Tijekom rada, ove se rupice povećavaju, površina zuba se sve više oštećuje, dolazi do grešaka geometrije, te na kraju do loma zuba.
- Pojava rupičenja je najizraženija u području oko diobenog (kinematskog) promjera, jer su tu najveći kontaktni pritisci.



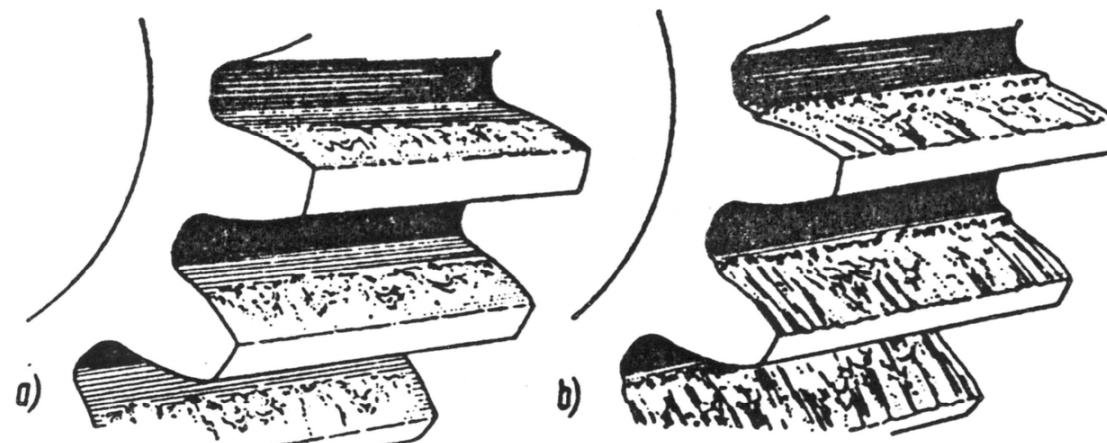
Kontaktna naprezanja bokova zubi



Pojava rupičavosti (pittinga) na bokovima:
a) početni stadij; b) kasniji stadij

Nosivost u odnosu na zaribavanje i trošenje

- Kod nepovoljnih kombinacija opterećenja, brzina klizanja, faktora trenja bokova, kakvoće površine obrade i temperature ulja, može doći do prekida uljnoga filma, a time i do metalnoga dodira bokova. Povećanim trenjem metalnih površina dolazi do pojačanog zagrijavanja i do hrapavljenja. Nadvišenja nastala hrapavljenjem zavaruju se, a odmah nakon togakidaju se zavarena mjesta. Zbog toga bivaju oba boka oštećena i naborana. Nosivost uvjetovana opterećenjem na zaribavanje nazivamo **nosivost u odnosu na zaribavanje**.
- Do trošenja (habanja) bokova dolazi kada zupčanici rade u području suhog ili mješovitog trenja. Prekomjerno trošenje može dovesti do toga da zupčanici postanu neupotrebljivi. Nosivost uvjetovana opterećenjem na trošenje nazivamo **nosivošću u odnosu na trošenje**.

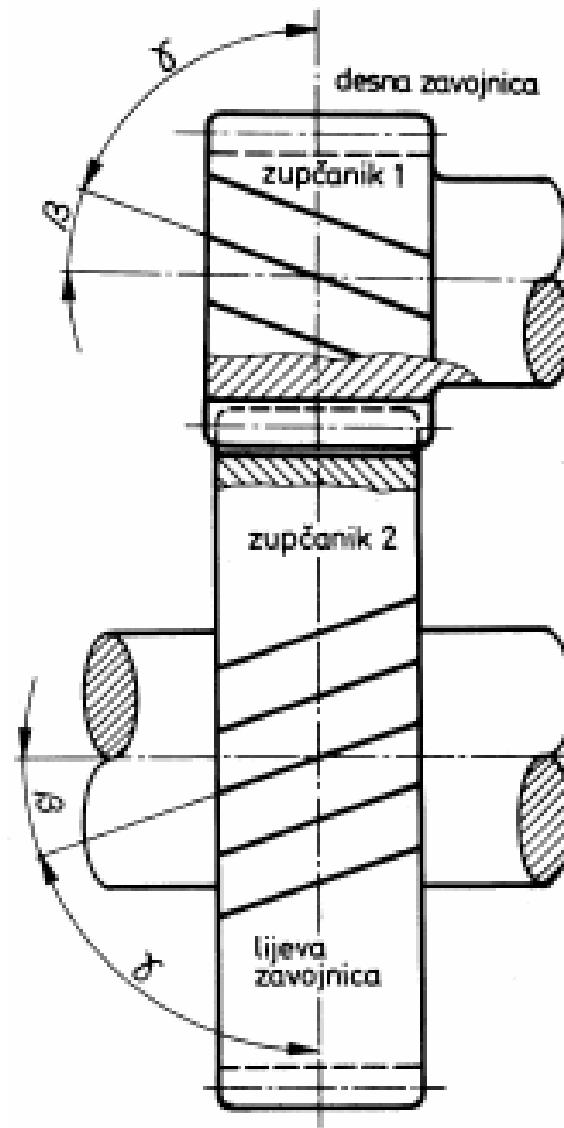


Zaribavanje bokova: a) početni stadij; b) kasniji stadij

Čelnici s kosim zubima

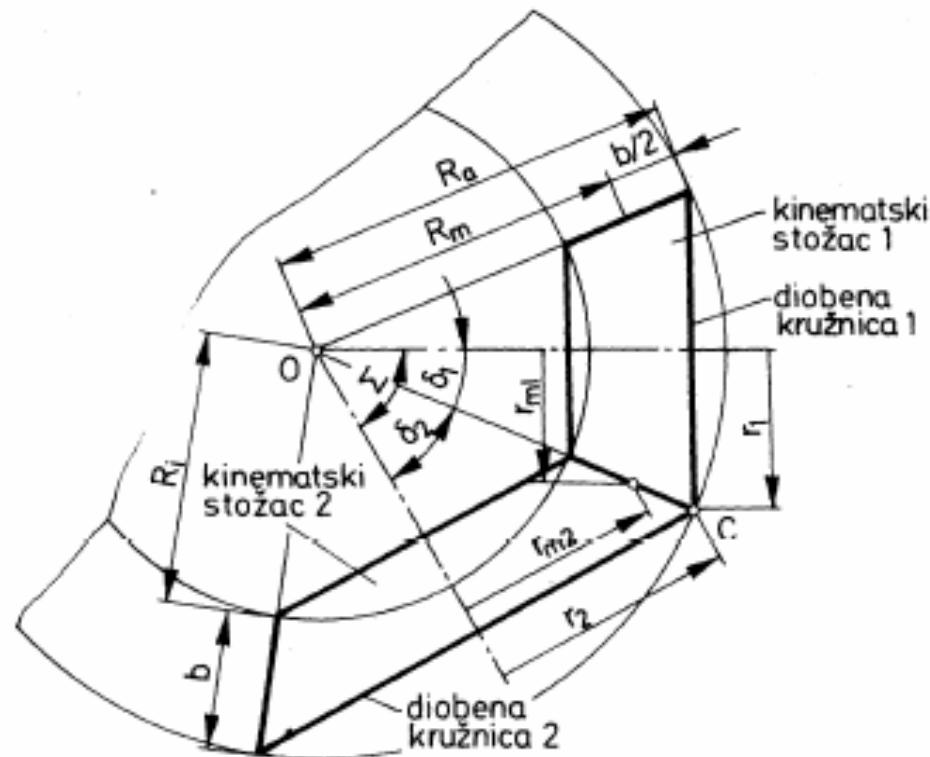
- Čelnici s kosim zubima u odnosu na čelnike s ravnim zubima imaju slijedeće prednosti:
 - Zubi postepeno ulaze u zahvat. Zahvat počinje na jednoj strani zuba i postepeno se širi po cijeloj širini zuba.
 - U zahvatu se istovremeno nalazi veći broj zubi.
 - Zubi se opterećuju postepeno, tako da je rad tiši.
 - Moguća je veća opteretivost.
 - Granični broj zubi (zbog podrezivanja korijena) je manji.
- Nedostatak je pojavljivanje aksijalne komponente sile, koju mora preuzeti vratilo i ležajevi, pa problem uležištenja postaje složeniji. Kut nagiba boka zuba β se definira u odnosu na os.
- Dva čelnika s kosim zubima u zahvatu imaju suprotne kutove nagiba boka zuba β . Ako na primjer pogonski zupčanik ima desnikut nagiba boka, onda gonjeni zupčanik ima lijevi kut nagiba boka. Kut nagiba boka zuba β se kreće između 8° i 20° .
- Kod vrijednostima manjih od 8° gubile bi se gotovo sve prednosti koje pružaju čelnici s kosim zubima, a kod vrijednosti većih od 20° aksijalna sila bi bila prevelika.

Čelnici s kosim zubima



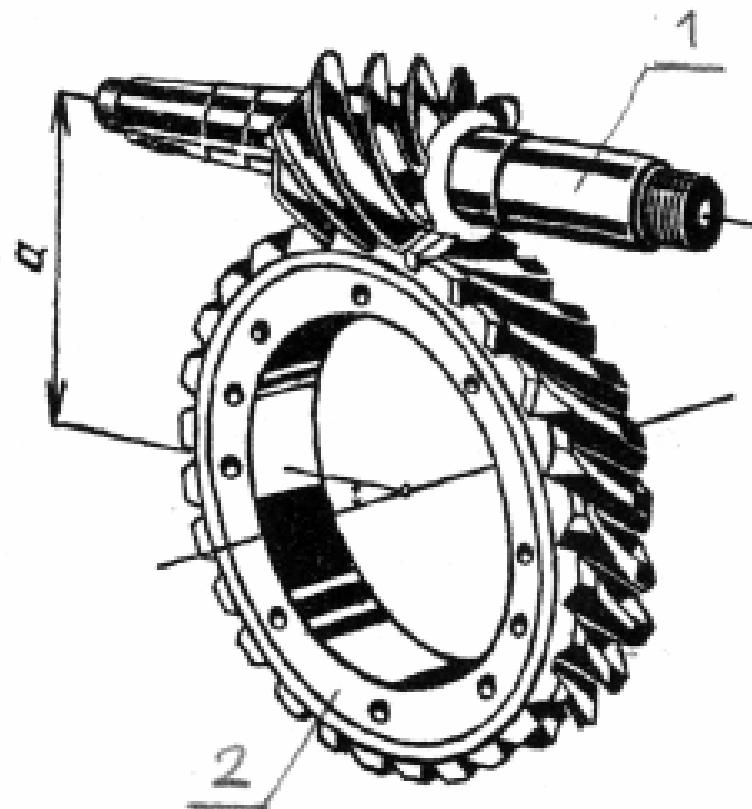
Konični zupčanici

- Najčešće se koriste za prijenos snage i gibanja pod pravim kutem, a bočna linija im može biti ravna, kosa ili zakrivljena. Kinematske površine su im stošci na kojima se vrši valjanje bez klizanja.
- Često se učvršćuju i konzolno, pa se javlja opasnost od progiba vratila.
- Najčešće je $\delta_1 + \delta_2 = \Sigma = 90^\circ$



Pužni prijenosnici

- Pužni prijenosnici se sastoje od puža (pužnog vijka) (1) i pužnog kola (2) čije se osi mimoilaze, obično pod kutem od 90° , ali može biti i pod kutem različitim od 90° . Puž može biti smješten iznad ili ispod pužnog kola, koje može biti horizontalno ili vertikalno.



Pužni prijenosnici

- **Prednosti pužnih prijenosnika:**
 - Vrlo veliki prijenosni omjeri (do $i \leq 100$); P_1 do 1000 kW, n_1 do 30 000 min-1.
 - Tihi rad prijenosnika, jer kod pužnih prijenosa nema valjanja zuba po zubu, nego samo klizanja zuba po zubu.
 - Visoka opteretivost, jer je istovremeno u zahvatu veći broj zubi.
 - Mogući su samokočivi prijenosi, kada je kolo pogonsko, ali u tom slučaju znatno lošiji stupanj djelovanja $\eta \leq 50\%$.
 - Manji su i lakši od prijenosnika s cilindričnim i koničnim zupčanicima.
- **Nedostaci:**
 - Stupanj djelovanja manji od stupnja djelovanja prijenosnika s cilindričnim i koničnim zupčanicima.
 - Zahtjeva precizno izradu, fine i glatke površine – brušenje.
 - Zbog niske iskoristivosti razvija se toplina koju treba odvesti prisilnim hlađenjem (ventilator).