vanja pod kontrolo, vendar to ne moti, ker se to vendarle dogaja približno na pravem mestu nekje pred zgornjo mrtvo lego. Diagram p—v zaradi tega ni bistveno popačen, ker je vžigalni del goriva neznaten v primerjavi z drugim vbrizganim gorivom. Postopek se bo zdel še toliko bolj razumljiv, če ga primerjamo z odsluženimi motorji z žarilno glavo, kjer je bilo vse gorivo vbrizgano med kompresijskim taktom in je zgorevalo časovno popolnoma nekontrolirano. Tovrstni motorji so obratovali zadovoljivo, če odštejemo za sedanje razmere nemogočo pomanjkljivost polurnega segrevanja glave pred zagonom motorja z zunanjim toplotnim izvorom. Za gorivo so bili motorji z žarilno glavo malo zahtevni in so pomenili prve motorje z več gorivi. Skušnje z motorji na žarilno glavo so zelo prav prišli pri gradnji motorja Fumisation, ki ima naslednje prednosti:

1) meja dimljenja je prestavljena daleč v področje večje vrtilne hitrosti in večjih obremenitev, zaradi česar je specifična volumenska moč motorja večja;

2) zahteve po cetanskem številu so brezpomembne, torej se lahko uporabljajo vse vrste goriv od plinskega olja do petroleja in bencina;

3) mirnejši in tišji tek motorja brez tolčenja;

4) za okoli 10 odstotkov manjša poraba goriva kot posledica popolnejšega zgorevanja brez dima;

5) dolgotrajnejša uporabnost motornega olja, ker se ne maže s sajami, ki nastajajo pri nepopolnem zgorevanju;

6) lažji motor kot posledica prednosti pod točko 1).

Sistem Fumisation za dovajanje goriva in gorenja ima podobne prednosti kakor postopek M, vendar so prednosti večje in dosežene po različni poti. Modifikacija tega sistema pa je francoski patent, znan z imenom Vigom.

Sistem Vigom za dovajanje goriva se oslanja na dvojno vbrizgavanje goriva, pri čemer sta obe vbrizgavanji časovno ločeni v dvo- ali štiritaktnem ciklusu zgorevalnega motorja. Odmikači na odmični gredi tlačilke za gorivo imajo dvojni profil, ki omogoča dvakratni vbrizg goriva, in sicer se prvič vbrizga — ali kakor bi tudi lahko opisali — vnaprej vbrizga že ob koncu izpušnega takta, pretežna količina goriva pa se vbrizga kakor pri sedanjih dieselskih motorjih. Cilj tega vžigalnega vnaprejšnjega vbrizga je prav isti kakor pri postopku Fumisation in so zato tudi prednosti podobne.

Tovarne precizne mehanike v Franciji že izdelujejo odmične gredi z dvojnim profilom, ki jih naknadno vgrajujejo v že obstoječe tlačilke na dieselskih motorjih. Zamenjava odmične gredi je tudi vse, kar je potrebno, da se zgorevalni proces spremeni oz. približa idealnemu enakotlačnemu procesu. Stopnja povišanja tlaka, ki je med drugim merilo za smotrno konstruiran dieselski motor, ostane pri sistemu dvojnega vbrizgavanja ugodna, pri čemer pomeni $\lambda = \frac{p_z}{p_c}$, tj. razmerje maksimalnega tlaka zgorevanja in končnega tlaka kompresije.

Nedvomno so opisane razvojne smeri zelo zanimive tudi za našo industrijo zgorevalnih motorjev, saj je splošno znano, da dieselski motor TAM po licenci Deutz precej tolče, pa čeprav mu tega v celoti ne zamerjamo zaradi zračnega hlajenja.

Kolikor bi uspešen razvoj hitrih dieselskih motorjev spremenil strukturo razmerja v potrošnji plinskega olja in bencina v korist prvega, ozir. če bi v motorjih z več gorivi lahko predelali vse destilate z vrelno krivuljo od 40 °C do 360 °C, in sicer z mnogo boljšim toplotnim izkoristkom, kakor je to mogoče v točasnem povprečnem bencinskem motorju, bi ne bilo več potrebe po zelo dragih rafinerijskih napravah za katalitično krekiranje in »reforming«, ker pač visokooktanskih goriv ne bi bilo treba pridobivati. Tudi vprašanje odvečnih količin nizkooktanskega bencina bi bilo s tem rešeno. Države, med katere spadamo tudi mi in skoraj vse socialistične države na vzhodu, ki jih je zdajšnji razvoj rafinerijskih naprav na zahodu prehitel, bi z novo koncepcijo gradnje ali predelave motorjev ponovno lahko ujele ravnotežje pri pridobivanju in potrošnji derivatov. Ne nazadnje pa bi bilo mogoče računati z ogromnim prihrankom pri gorivu.

Analogen prehod na cenejše gorivo že doživlja letalski promet, ki opušča drago visokooktansko gorivo za letalske batne motorje in uvaja reaktivne motorje, ki uporabljajo polovico cenejši kerosin tj. ozko destilacijsko frakcijo očiščenega petroleja. Cena goriva v tem primeru sicer ni bila edini razlog za spremembe, vendar lahko rečemo, da je bistveno posegla v potek dogodkov.

Sklep in namen tega sestavka naj bi bil sprožiti misel, zakaj se ne oprimemo uresničevanja takih možnosti, ki bi v gospodarstvu pomenile velik prihranek pri energiji in napravah za pridobivanje. Za zgorevanje cenenih goriv v lahkih, hitrih motorjih z dobrim izkoristkom obstajajo realne zasnove, ki pa se vse prepočasi uveljavljajo v praktičnem življenju.

Avtorjev naslov: Tone Tomšič, dipl. ing., »Petrol«, Ljubljana, Vošnjakova 2

DK 621.833:621.07

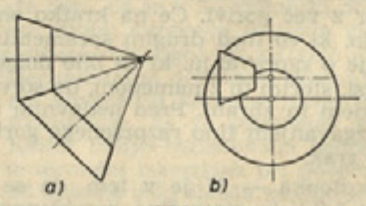
Primerjava med obdelovalnimi postopki za spiralno stožčaste zobnike

PAVLE ŠMARČAN

Uvod

Še v prejšnjem stoletju je zobnik veljal za drag strojni element z zelo slabim izkoristkom in kaj neprimeren za enakomeren prenos vrtilnega gibanja. Avtomobilska industrija pa je že brž v začetku potrebovala kvalitetne zobnike. To je marsikaterega konstrukterja spodbudilo k iskanju novih obdelovalnih metod in snovanju novih obdelovalnih strojev za obdelavo zobnikov. Največji napredek pa je bil dosežen ravno na področju stožčastih zobnikov, ki so se najteže uveljavili v zahtevnih prenosih, saj jih zelo dolgo ni bilo mogoče izdelovati dovolj natančno.

Stožčasto zobniško dvojico je mogoče izdelati in vgraditi na dva načina, kar je razvidno s slike 1. Slika 1a kaže primer vgraditve s sekajočimi se osmi, slika 1b pa hipoidni pogon s križajočimi se osmi (mimobežne osi).



Slika 1

Stožčasti zobniki s spiralnim ozobjem zavzemajo med zobniki čisto posebno mesto. Pri zobnikih nasploh je oblika zoba popolnoma natančno določena s številom zob, vpadnim kotom, kotom poševnosti zoba in profilnim pomikom. S temi podatki lahko izdelujemo zobnik po poljubnem izdelovalnem postopku — kotal-

nem ali oblikovalnem. Nadalje se lahko ti zobniki ubirajo, čeprav so izdelani po različnih obdelovalnih postopkih. Tudi trdnostne in tekalne lastnosti gonila v glavnem niso odvisne od izdelovalnega postopka, če seveda mislimo na enako kvaliteto.

Pri stožčastih zobnikih s spiralnimi zobmi pa to ne drži. Tu imamo namreč opravka še z enim zelo pomembnim faktorjem, z vzdolžno ukrivljenostjo zoba oziroma z obliko spirale zoba. Glede na obliko vzdolžne krivulje zoba se stožčasto gonilo pod obremenitvijo obnaša različno, zaradi česar je treba pri izbiri ozobja temu pojavu posvečati posebno skrb. Vzdolžna krivulja zoba je odvisna od postopka na obdelovalnem stroju in je ni mogoče brez pomisleka spreminjati. Zato ni mogoče vgrajevati in ubirati dveh spiralno stožčastih zobnikov, ki sta izdelana po različnih obdelovalnih postopkih.

Spričo okoliščine, da spiralno stožčaste zobnike največ uporabljamo v avtomobilski industriji, jih bomo v nadaljnjem obravnavali po teh vidikih.

1.0. SPLOŠNO

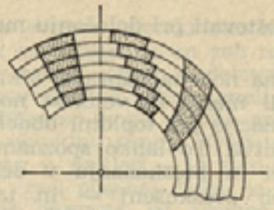
1.01. Bistvo spiralnega ozobja

Nasploh lahko trdimo, da imajo spiralno ozobje tisti stožčasti zobniki, katerih zobje niso ravni v smeri širine zoba, kar je razvidno s slike 2. Slika ponazarja, kako si pri stožčastih zobnikih lahko zamislimo prehod ravnega zoba v spiralno obliko. Vzdolžna krivulja zoba pa praktično ni nikoli spirala, ampak neka drugačna krivulja, toda o tem pozneje.

Vsi ravni zobje, tako pri valjastih kakor tudi pri stožčastih zobnikih, imajo določene pomanjkljivosti. Pri ravnih zobeh lahko dosegamo enakomeren prenos vrtilnega gibanja in s tem miren tek le tedaj, če je profil zoba absolutno natančen. Praktično pa je to nemogoče doseči. Tej natančnosti se kolikor toliko lahko približamo edinole z brušenjem. Med obratovanjem pa se — na žalost — tudi ta natančnost brž izgubi. Čisto kotaljenje je namreč le na kotalnem (razdelbnem) krogu, na drugih delih boka zoba pa gre za kotalno drsenje, ki je tem večje, čim večja je oddaljenost od kotalnega kroga. Zaradi tega se koren in vrh zoba obrabljata hitreje kakor pa sredina zoba. To je tudi razlog, da zobnike z ravnimi zobmi teže lepamo.

Pri zobnikih z ravnimi zobmi imamo navadno zelo majhno stopnjo profilnega ubiranja, ki je nekje med 1 in 2. Zaradi tega sta izmenoma obremenjena dva oziroma en zob, kar povzroča sunkovito obremenitev zoba in neenakomeren prenos.

Vseh teh težav pri zobnikih s spiralnimi zobmi ni. Nasprotno, prednosti so tolikšne, da lahko brez premisleka trdimo: spiralni zobje so idealna oblika za stožčaste zobnike. Absolutna natančnost profila za enakomeren prenos vrtilnega gibanja tukaj ni neogibno potrebna, ker imamo vedno stične točke tudi na kotalnem krogu. Kakor pri valjastih zobnikih s poševnimi zobmi, imamo tudi tu stik med zobmi na neki liniji, ki ni paralelna z razdelbno linijo, temveč jo seka pod določenim kotom in gre od korena proti vrhu zoba. Zaradi drsenja na tistih delih boka, ki niso na kotalnem stožcu, je na teh mestih obraba večja. Spričo tega je stalni stik na kotalnem stožcu še bolj zajamčen in tako zaradi čistega kotaljenja na tem mestu tudi enakomeren prenos. Celotna obraba zoba je pri spiralno stožčastih zobnikih manjša, s tem pa daljša življenjska doba. Tudi za lepanje so pogoji ugodnejši in se zobniki s tem postopkom dejansko izboljšujejo. Prav tako je večja tudi trdnost ukrivljenega zoba v primerjavi z ustreznim ravnim zobom. Pri ravnem zobu se v določenem trenutku lahko



Slika 2

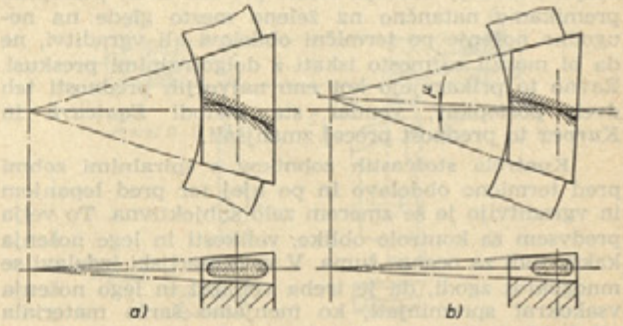
obremenitev skoncentrira na vrhu zoba. Pri spiralnem zobu je to nemogoče, saj je stična črta poševno od korena proti vrhu. Tudi celotna stopnja ubiranja je tu navadno večja od 2 in zaradi tega obremenitev enakomerneje prehaja od zoba na zob.

1.02. Kakšni naj bodo spiralno stožčasti zobniki?

Vse naštete prednosti dajejo možnost, da uporabljamo za prenos enakih moči manjše zobnike od ustreznih zobnikov z ravnimi zobmi. V začetku je avtomobilska industrija vgrajevala za pogon na zadnji premi stožčasti zobnike z ravnimi zobmi. Leta 1913 pa so začeli postopoma vgrajevati stožčaste zobnike s spiralnimi zobmi. Zdaj so skoraj v rabi brez izjem. Pogoni pri motornih vozilih so zelo zahtevni glede na veliko varnost, trdnost in predvsem miren tek. Nadalje so v obeh smereh vrtenja obremenjeni z zelo spremenljivimi obremenitvami. Pri tem naj bo teža teh gonil majhna in naj ne bodo občutljiva za deformacije zaradi elastične gradnje. Zobniki v zadnji premi so navadno cementirani in kaljeni ter nato lepani. Deformacijam pri termični obdelavi se tudi z največjo skrbnostjo žal ni mogoče popolnoma izogniti. Pri termični obdelavi se navadno nekoliko spremeni kot spirale.

1.03 Lokalizirano nošenje

Zob je treba izdelati tako, da dosežemo »lokalizirano nošenje« (slika 3), če se hočemo izogniti nošenju na robu, brž ko se med pogonom spremeni medsebojna lega gonilnega in krožnikastega zobnika. Tako se lahko izognemo tudi škodljivemu vplivu manjših deformacij zaradi termične obdelave. Seveda pa je zelo težko zasnovati tako lokalizirano nošenje, ki naj bi še zadovoljevalo tudi pri največjih premikih, pa pri tem vendar ne bi nastajala čezmerna obraba ali celo najedanje. Odtis nošenja pred termično obdelavo redko leži na istem mestu kakor po termični obdelavi. Tudi z lepanjem se lega nošenja spreminja, ker je med deli boka zoba, ki med seboj drsijo, odvzemanje večje kakor pa med kotalečimi se deli. To



Slika 3

vse je treba upoštevati pri določanju mesta in velikosti odtisa nošenja.

Žal ni znana nobena naprava, s kakršno bi lahko vnaprej določali mesto in velikost nošenja glede na poznejše deformacije pri toplotni obdelavi in premike zaradi obremenitve. To lahko spoznamo šele po večkratni vgraditvi in preskušanju v delovnih pogojih. Ocenjevanje teh preskušenj — in tako utemeljeno spreminjanje pri nastavitvi obdelovalnega stroja — je zelo subjektivno in združeno z dolgoletnimi skušnjami. Zaradi tega je nesmiselno izdelovati zobniško dvojico kratko in malo po risbi, pa po vgraditvi pričakovati, da bo ustrezala.

Iz tega lahko povzamemo, da je treba korekciji bočne linije zoba posvetiti vso pozornost, obdelovalni postopki pa morajo biti taki, da je mogoče korekcijo prilagajati raznim zahtevam pri nošenju. Prvi graditelji obdelovalnih strojev za izdelavo spiralnih stožčastih zobnikov so si prizadevali izdelati tak stroj, da bi dodelal teoretično čim natančnejšo obliko zoba. Šele potrebe avtomobilske industrije so privedle do obdelovalnih metod, po katerih je mogoče zob oblikovati tako, da ustreza obratovalnim pogojem. Paradoksno je, da je lažje izdelovati take zobnike, ki imajo nošenje po vsej širini zoba, kakor pa takšne, ki imajo ustrezno lokalizirano nošenje.

Glede na možnosti prilagajanja pri nošenju so konstrukterji ubirali različne poti. Na obdelovalnih strojih za spiralne stožčaste zobnike Gleason in Modul do nedavna ni bilo mogoče izdelovati zob, ki bi nosili po vsej širini, ker je ta obdelovalni sistem že načeloma približen. Zobni stik je vselej več ali manj lokaliziran. Vendar lahko velikost in lego stika spreminjamo v precejšnjem obsegu in dosegamo zaželeno nošenje. Znano pa je, da so za to spreminjanje potrebni precej obširni preračuni in poskusi, vrhu tega pa tudi mnogo nastavitev. Zategadelj je pač ugodnejše, da vsak bok zoba obdelujemo na posebnem stroju. Vse to pa se izplača seveda samo pri velikih serijah.

Vzlic temu sta obe podjetji v precejšnji meri odpravili omenjene hibe z najnovejšimi postopki pri obdelavi. V ta namen je Gleason razvil t. i. metodo »*Equicurv*«, Modul pa postopek »*Kurvex*«. Med drugim je s tema dvema postopkoma laže računsko obvladovati področje nošenja in tako ekonomično izdelovati tudi majhne serije.

Konstrukterji pri podjetjih Oerlikon in Klingelnberg so izbrali takšne obdelovalne postopke, s kakršnimi je tudi teoretično možno izdelati zob, ki nosi po vsej širini. Lokalizirano nošenje pa je mogoče doseči tako, da bočne linije zoba namerno korigiramo, in sicer tako, da se ne držimo teoretično natančne izdelave ali pa kakorkoli drugače odvzemamo material na določenih mestih boka zoba. Na vsakem zobniku režemo hkrati oba boka v zobni vrzeli in neposredno izdelamo zaželeno obliko ter ustrezno korekcijo bočne linije. Področje nošenja lahko pri teh dveh postopkih premikamo natančno na želeno mesto glede na neugodno nošenje po termični obdelavi ali vgraditvi, ne da bi morali to mesto iskati z dolgotrajnimi preskusi. Ravno to prikazujejo kot eno največjih prednosti teh dveh postopkov, vendar sta metodi *Equicurv* in *Kurvex* to prednost precej zmanjšali.

Kontrola stožčastih zobnikov s spiralnimi zobmi pred termično obdelavo in po njej ter pred lepanjem in vgraditvijo je še zmerom zelo subjektivna. To velja predvsem za kontrolo oblike, velikosti in lege nošenja kakor tudi za oceno šuma. V velikoserijski izdelavi se mnogokrat zgodi, da je treba velikost in lego nošenja vsakokrat spreminjati, ko menjamo šaržo materiala ali kakšno drugo, na prvi pogled nepomembno podrobnost v obdelovalnem postopku.

1.04. Mirni tek

Predvsem velja poudariti, da so se zahteve glede mirnega teka pri pogonu na zadnji premi avtomobilov v zadnjih letih zelo zaostrile. Celo pri cenenih vozilih naj bo stožčasti prenos pri vleku in potisku ter pri vsaki obremenitvi skoraj neslišen. Ta zahteva je zelo v ospredju predvsem v Evropi zaradi samonosnih karoserij in lahkih izvedb, ki zaradi zmanjšanja teže ne dopuščajo težkih izolacij proti šumu. Ameriška vozila pa imajo ponajveč še šasije, ki ne prenašajo šuma tako neposredno navznoter. Tudi s težo mase proti šumu ne varčujejo. Seveda pa si moramo biti v svesti, da nastajajo pri avtomobilih z dieselskimi motorji in motornimi zavorami pri zaviranju z motorjem velike obremenitve, ki lahko še dodatno povzročajo glasen tek zobnikov.

1.05. Zamisel o izdelavi

Gradnja obdelovalnih strojev za zobčanje spiralnih stožčastih zobnikov se je v zadnjem pol stoletju zelo razvila. Težko je zadostno poudariti težave pri gradnji teh strojev. Izdelovalec mora predvsem dobro poznati gonila, v katera bodo zobniki vgrajeni. Razen obdelovalnega postopka mora biti dobro seznanjen z vsemi operacijami pred zobčanjem in po njem ter njihovimi vplivi na ozobje. V ta namen so potrebne dolgoletne študije in veliki napori.

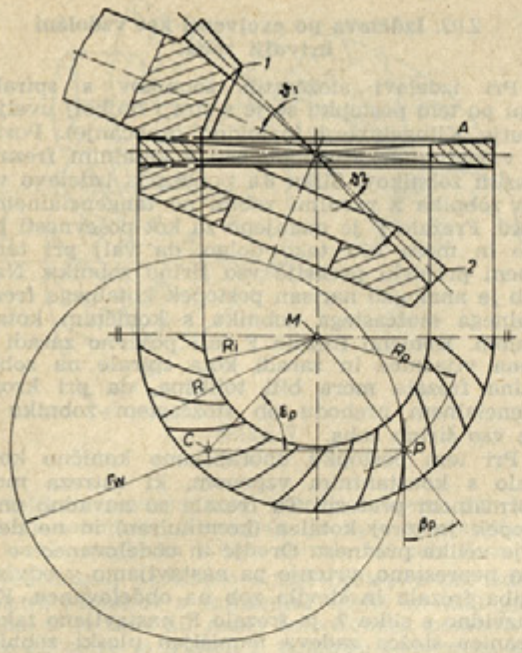
V ZDA je podjetje Gleason prvo začelo izdelovati obdelovalne stroje za spiralne stožčaste zobnike in tudi vse pomožne stroje za kontrolo, kaljenje, lepanje itd. Še zdaj so ti stroji najbolj razširjeni po svetu. Gleasonovi konstrukterji so si v začetku prizadevali doseči čim večjo produktivnost pri tisti kvaliteti, ki ravno še zadošča. Stroje so specializirali na eno samo operacijo s pogojem, da bodo določeno vrsto zobnikov izdelovali v zelo velikih serijah. Stroji firme Modul so grajeni po enakih vidikih. Graditelji pri Oerlikonu in Klingelnbergu pa so konstruirali čimbolj univerzalne stroje, ki jih je zelo lahko mogoče prilagajati raznim obdelovancem, in to v majhnih ali tudi velikih serijah. V zadnjih letih so se te razlike v težnjah nekoliko zmanjšale. Stroji podjetij Gleason in Modul postajajo bolj univerzalni, stroji Oerlikona in Klingelnberga pa boljši glede storilnosti. Nasploh pa Gleason in Modul še vedno izdelujeta spiralne zobnike za pogon avtomobilskih osi na več specialnih strojih s petimi operacijami v povprečju, Oerlikon in Klingelnberg pa izhajata z dvema do tremi operacijami, navadno na enem stroju.

2.0. IZDELAVA SPIRALNIH STOŽČASTIH ZOBNIKOV

Osnova za izdelavo ravnih in seveda tudi spiralnih stožčastih zobnikov je namišljen ploski zobnik, ki je smiselno identičen z namišljeno zobato letvijo pri izdelavi valjastih zobnikov. Izdelovalni postopek je v bistvu medsebojno kotaljenje ploskega zobnika A in obdelovanca (slika 4). Obdelovalno orodje sestavlja torej en ali več zob tega namišljenega zobnika. To načelo zanemarjata samo Gleasonov postopek »Formate« in ustrezni oblikovni postopek pri Modulu.

Najpreglednejše je, če karakteristike spiralnih stožčastih zobnikov preučujemo in med seboj primerjamo na ploskem zobniku. Po sliki 4 je zunanji polmer ploskega zobnika enak zunanji razdalji stožca R zobniške dvojice, notranji polmer R_i pa je enak notranji razdalji stožca. Če se osi obeh zobnikov sekata pod kotom 90°, dobimo število zob ploskega zobnika z_p iz števila zob z_1 in z_2 zobnika 1 in 2:

$$z_p^2 = z_1^2 + z_2^2 \qquad (1)$$



Slika 4

Nekje na zobu si navadno izberemo določeno preračunsko točko P, ki je za trdnostni preračun največkrat nekje blizu sredine širine zoba, za dimenzijski preračun pa na zunanjem premeru zobnika. Razdaljo točke P od središča ploskega zobnika M imenujemo računsko razdaljo stožca R_p. Modul v čelnem prerezu v točki P je:

$$m_t = \frac{2\,R_p}{z_p} \qquad (2)$$

Modul v prerezu pravokotno na spiralo m_p v točki P pa dobimo iz modula m_t v odvisnosti od kota spirale β_p:

$$m_p = m_t \cos \beta_p \qquad (3)$$

Modul m_p in kot spirale β_p sta lahko konstantna po vsej širini zoba, lahko pa tudi zelo variirata.

Kakor je že omenjeno, vzdolžna krivulja zoba — geometrično vzeto — ni spirala in niti ni postopka, po katerem bi lahko izdelali spiralno oblikovan zob. Vsekakor se je ime »spiralni stožčasti zobnik« za vse zobnike z ukrivljenimi zobmi udomačilo tako, da bo najbrž tudi ostalo.

Doslej so v glavnem prišli v veljavo trije postopki, ki imajo za vzdolžno krivuljo zoba na ploskem zobniku: krožni lok, evolvento in cikloido. Postopkov, po katerih je mogoče dosegati drugačne vzdolžne krivulje zoba, ne bomo omenjali. V praksi namreč ne pomenijo mnogo, ker so pač glede storilnosti daleč za prej omenjenimi.

2.01. Izdelava po krožnem loku kot vzdolžni krivulji zoba

Ta postopek je že zelo zgodaj začelo razvijati podjetje Gleason v ZDA. Podjetje Modul v NDR tudi izdeluje obdelovalne stroje krožnega loka kot vzdolžne krivulje zoba. Orodje je frezalna glava (plošča), ki ima na obodu nameščene nože na polmeru r_w (slika 5). Noži frezalne glave sestavljajo en zob namišljenega ploskega zobnika A (slika 4), ob katerem se obdelovanec kotali med obdelavo. Tako obdelujemo zobno vrzel. Nato obdelovanec odmaknemo nekaj več kakor za globino zoba in delimo za en zob naprej. Za obdelavo naslednje zobne vrzeli obdelovanec zopet primikamo do polne globine zobne vrzeli in obenem kotalimo, da profiliramo boke. Profil noža ima namreč ravne boke — oktoidno ozobje. Obdelovalni postopek je torej prekinjen — delilen — in zato je treba kotaliti za vsako zobno vrzel posebej. Imeti je treba torej zelo natančne delilne naprave, če hočemo ublažiti znane težave delilnih postopkov.

Če je potrebna kolikor toliko dobra kvaliteta, moramo zobno vrzel najprej grobo obdelati s posebno operacijo in šele nato dokončno obdelati še s posebno operacijo. Na krožnikastem zobniku opravimo to operacijo navadno s frezalno glavo, ki ima izmenično postavljene nože z zunanjo in notranjo ostrino. Tako orodje obdeluje obe strani zobne vrzeli hkrati. Pri gonilnem zobniku pa navadno ozobčamo dokončno v dveh operacijah z dvema frezalnima glavama. Pri tem ena obdeluje le eno stran zobne vrzeli. Vsaka glava ima torej samo eno vrsto nožev: ena nože z zunanjo ostrino, druga pa nože z notranjo ostrino. Razdelitev dokončne obdelave na dve operaciji pri gonilnem zobniku je neogibno potrebna zato, da lahko popravimo odstopek pri obliki zoba, ki izhaja že iz samega obdelovalnega postopka. Ti odstopki nastajajo zato, ker reže frezalna glava po vsej širini zoba enako širino zobne vrzeli. Posledica tega bi bil prešibak zob na notranjem premeru zobnika.

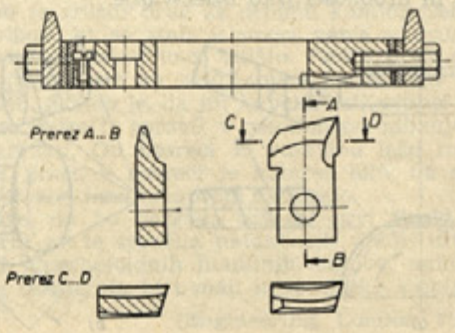
Ta odstopek lahko odpravimo tako, da zmanjšamo globino zoba na notranjem robu. Zato pa je treba frezalno glavo nastaviti na manjšo globino na notranjem robu. S tem dobimo po vsej širini pravilno debelino zoba. Želeno je, naj bi se modul v normalnem prerezu zoba, širina in globina zobne vrzeli manjšali proporcionalno z manjšim premerom. Koren zoba torej ni vzporeden z razdelbnim stožcem, ampak je proti njemu nagnjen za vznožni kot ϑ_1 oziroma ϑ_2 (slika 4). Frezalna glava reže torej v smeri vznožnega stožca, ne pa v smeri razdelbnega stožca. Zaradi tega se vpadni kot v normalnem prerezu zoba α_n spremeni in je treba nagibne kote na nožih ustrezno popraviti. Ta korektura je odvisna od kota spirale β in vznožnih kotov ϑ_1 in ϑ_2 ter različna za oba boka zoba. Med obratovanjem se vedno ubira konkavni bok enega zobnika (npr. zobnik 1 na sliki 14) s konveksnim bokom zoba drugega zobnika (zobnik 2 na sliki 14). Med vpadnim kotom α_n v normalnem prerezu in nagibnima kotoma orodja α_1 (zobnik 1 — konkavni bok) in α_2 (zobnik 2 — konveksni bok) je razmerje naslednje:

zobnik 1 (konkavni):

$$\sin \alpha_n = \sin \alpha_1 \,.\, \cos \vartheta_1 + \cos \alpha_1 \,.\, \sin \vartheta_1 \,.\, \sin \beta \qquad (4)$$

zobnik 2 (konveksni):

$$\sin \alpha_n = \sin \alpha_2 \,.\, \cos \vartheta_2 - \cos \alpha_2 \,.\, \sin \vartheta_2 \,.\, \sin \beta \qquad (5)$$



Slika 5

Z danim vpadnim kotom v normalnem prerezu α_n in spiralnim kotom β, ki morata biti za oba zobnika enaka, lahko z gornjimi enačbami izračunamo oba nagibna kota nožev α_1 in α_2. Iz enačb (4) in (5) izhaja: če spiralni kot β povečujemo, se vpadni kot α_n v normalnem prerezu na konkavnem boku veča, na konveksnem boku pa manjša. Vpadna kota se torej protismerno spreminjata in vedno manj ustrezata drug drugemu. Ker sta kota vznožja zoba (ϑ_1, ϑ_2) in nagibna kota (α_1, α_2) na orodju za vso širino zoba konstantna, se tudi kot spirale β po širini zoba ne bi smel spreminjati, če naj se vpadni kot v normalnem prerezu ujema.

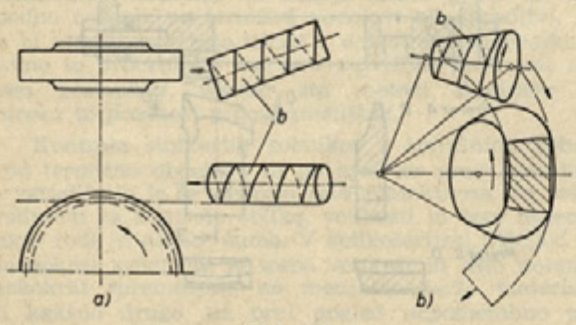
Konstantni kot spirale po vsej širini zoba pa bi imeli le takrat, če bi bila vzdolžna krivulja zoba logaritmična spirala. Krožni lok pa ima spremenljiv kot spirale. Spremembo kota spirale vzdolž širine zoba pa lahko držimo razmeroma majhno le takrat, če damo frezalni glavi tak polmer r_w, ki ustreza krivinskemu polmeru pripadajoče logaritmične spirale:

$$r_w = \frac{R_p}{\sin \beta_p} \tag{6}$$

Vrednosti v gornji enačbi se nanašajo na točko P v sredini širine zoba. Po gornji enačbi dobimo — predvsem pri majhnih kotih spirale — zelo velike polmere frezalnih glav, ki presegajo zmogljivosti obdelovalnih strojev. Zato smo navadno primorani jemati manjše frezalne glave. Odstopke pri obliki zoba, ki neogibno izhajajo iz tega in se pojavljajo v obliki poševnega nošenja, pa korigiramo s spremembo nastavitev na stroju.

Kakor je že omenjeno, se vedno ubirata konkavni bok enega zobnika s konveksnim bokom nasprotnega zobnika. Ker pa so konkavni boki obdelani vedno z večjim polmerom frezalne glave kakor konveksni, dobimo vedno lokalizirano nošenje. Nošenje po vsej širini zoba je teoretično nemogoče, kar pa niti najmanj ne moti, saj tako ni zaželeno.

Kakor vidimo, ima zmanjševanje višine zoba proti notranjemu premeru za posledico neujemanje vpadnih kotov, poševno nošenje ipd. Ker pa je treba ta odstopanja ohraniti v znosnih mejah, je na obdelovalnem stroju mogočih precej dodatnih nastavitev, ki jih ni mogoče natančno izračunati, temveč so za to potrebni preskusi in skušnje. Že omenjena najnovejša obdelovalna postopka — Equicurv (Gleason) in Kurvex (Modul) — pa te težave skoraj docela odpravljata. Oba postopka se sicer med seboj razlikujeta v določenih finesah, zgrajena sta pa na enaki teoretični osnovi. Izhodiščna vzdolžna krivulja zoba je krožni lok, globina zobne vrzeli je po vsej širini konstantna in vsak bok zobne vrzeli je posebej obdelan. Te osnove omogočajo izdelavo tudi teoretično natančnega zoba in natančno izračunanje korekture nošenja ter spremenijo ta postopek obdelave v ekonomičnega tudi za posamično in drobnoserijsko izdelovanje.



Slika 6

2.02. Izdelava po evolventi kot vzdolžni krivulji zoba

Pri izdelavi stožčastih zobnikov s spiralnimi zobmi po tem postopku se je s stroji najbolj uveljavilo podjetje Klingelnberg (paloidno ozobčanje). Postopek ima v bistvu nekaj podobnosti s kotalnim frezanjem valjastih zobnikov. Slika 6a ponazarja izdelavo valjastega zobnika z ravnimi zobmi po tangencialnem postopku. Frezalo F je nagnjeno za kot poševnosti bočne linije in mora biti tako dolgo, da valj pri tangencialnem prehodu prekrije vso širino zobnika. Na sliki 6b je analogno narisan postopek kotalnega frezanja spiralnega stožčastega zobnika s koničnim kotalnim frezalom. Konično frezalo F leži poševno zaradi kota vzpona vijačnice in zaradi kota spirale na zobniku. Dolžina frezala mora biti tolikšna, da pri krožnem tangencialnem prehodu ob stožčastem zobniku prekrije vso širino zoba.

Pri tem postopku uporabljamo konično kotalno frezalo s konstantnim vzponom, ki ustreza modulu v normalnem prerezu. Ta frezala so navadno enojna. Postopek je torej kotalen (kontinuiren) in ne delilen, kar je velika prednost. Orodje in obdelovanec se torej vrtita neprestano, vrtenje pa nastavljamo v odvisnosti od giba frezala in števila zob na obdelovancu. Kakor je razvidno s slike 7, je frezalo F nastavljeno tako, da s stranico stožca zadeva namišljen ploski zobnik A, z osjo pa tangira v točki T neki krog s polmerom ϱ. Krog s polmerom ϱ je osnovni krog evolvent, ki sestavljajo vzdolžno krivuljo zoba.

Frezalo mora biti vedno prisekan stožec, ker mora imeti na ozkem koncu določen minimalni premer glede na višino zoba oziroma modula m_n v normalnem prerezu. Zaradi tega je polmer osnovnega kroga ϱ vedno manjši od notranjega premera ozobja R_i za vrednost g.

$$\varrho = R_i - g \tag{7}$$

Vrednost $g = (1{,}5 \ldots 2)\, m_n$

Povezava med gornjimi veličinami:

$$m_n z_p = 2\varrho = 2(R_i - g) \tag{8}$$

Modul v normalnem prerezu je po vsej širini zoba konstanten. To je pogoj, saj je razdalja med dvema evolventama z istim osnovnim krogom tudi konstantna. Ustrezno temu je tudi višina zoba po vsej širini konstantna, se pravi, da sta vrh in koren zoba paralelna. To je trdnostno zelo ugodna rešitev.

Notranji polmer R_i in polmer osnovnega kroga ϱ tudi zato ne smeta biti enaka, ker deli evolvente pri osnovnem krogu niso primerni za vzdolžno krivuljo zoba. Tu ima evolventa zelo spremenljiv krivinski polmer in jo je zelo težko dobro obdelati.

Veliki premer frezala pa je predvsem odvisen od nagiba in širine zob. Stranica frezala mora biti najmanj tako dolga, da prekrije vso širino zoba.

Kot spirale se od notranjega konca zoba proti zunanjemu stalno veča in je v poljubni točki X:

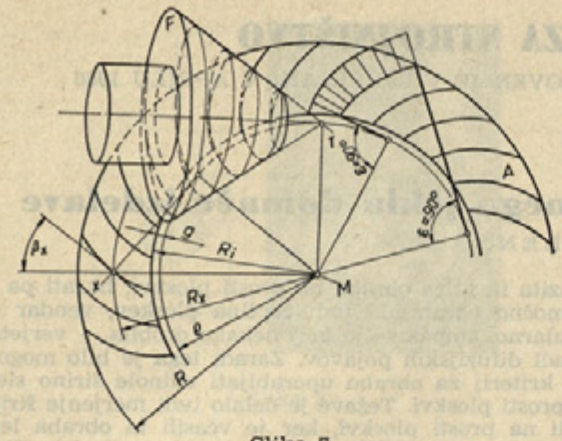
$$\cos \beta_x = \frac{\varrho}{R_x} \tag{9}$$

Krivinski polmer vzdolžne krivulje zoba se tudi veča proti zunanjemu koncu zoba in je lahko 3- do 4-krat večji kakor na notranjem koncu zoba. Krivinski polmer v točki X:

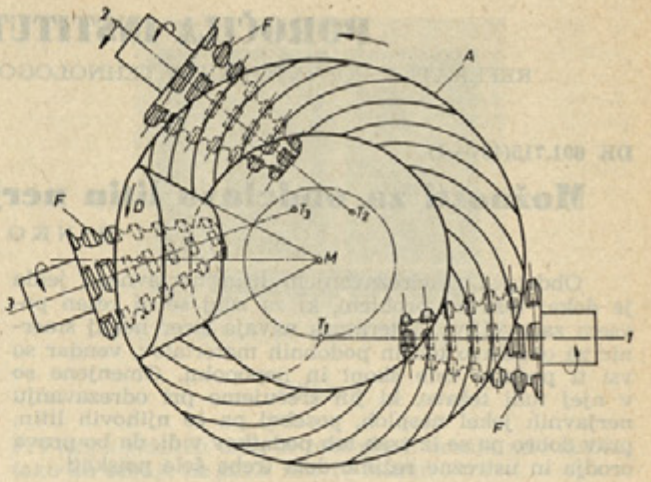
$$r_x = R_x \sin \beta_x = \sqrt{R_x^2 - \varrho^2} \tag{10}$$

Na sliki 7 sta najmanjši in največji krivinski polmer izvlečena debelo.

Zaradi stroge medsebojne odvisnosti modula v normalnem prerezu, kota spirale, krivinskega polmera, osnovnega kroga itd., ter ugodne oblike frezala glede



Slika 7



Slika 8

na kvaliteto rezanja smo precej omejeni pri izbiri dimenzij zobnikov. Nemogoče je npr. napraviti zobnike z zelo majhnim kotom spirale ali celo $\beta = 0°$.

Vse dozdaj povedano o tem postopku pri izdelavi stožčastih zobnikov s spiralnimi zobmi in tudi pogled na sliko 7 je bolj ali manj teoretičnega pomena. Dejansko ne more os frezala F tangirati osnovnega kroga v točki T (slika 7) oziroma v točki T_1 (lega 1 — slika 8). To bi bilo mogoče le tedaj, če bi bil kot vzpona vijačnice na frezalu 0°, kar pa seveda ni izvedljivo. Frezalo je treba torej nagniti za kot vzpona njegove vijačnice, da ta vzpon sovpada s smerjo zob. Zaradi tega pride vrh stožca frezala znotraj osnovnega kroga — točka T_2 na sliki 8. Vzdolžna krivulja zoba zaradi tega ni natančna evolventa, ampak podaljšana evolventa, kar pa je praktično nepomembno.

Če bi izdelovali ploski zobnik A, bi lahko pustili frezalo stalno v legi 2 po sliki 8 in bi samo frezalo in zobnik vrteli v medsebojnem prenosnem razmerju. Ker pa navadno izdelujemo zobnike D, ki so bolj ali manj konični (lega 3 — slika 8), mora imeti frezalo F še dodatno gibanje, kakor je opisano za sliko 6b. To gibanje je neogibno potrebno, da izoblikujemo bok zoba in ga superponiramo vrtilnemu gibanju zobnika. Seveda je zelo počasno, ker mora trajati ves čas obdelovanja.

Konično kotalno frezalo je pravzaprav najzahtevnejši element. Navadno so frezala enojna. Dvohodna se uporabljajo le za grobo obdelavo. Za izdelavo zobniške dvojice potrebujemo dve frezali. Leva spirala mora imeti desno frezalo, nasprotni zobnik — ki ima seveda desno spiralo — pa mora imeti levo frezalo. Pri prehodu začne frezalo rezati vedno z velikim premerom in s tem obdeluje grobo, medtem ko z majhnim premerom končuje in obdeluje fino.

Brez pomisleka lahko obdelamo zobniško dvojico na enem stroju. Če pa imamo večje serije, vzamemo tri stroje: prvega za grobo obdelavo in drugega za fino obdelavo krožnikastega zobnika ter tretjega za celotno obdelavo gonilnega zobnika.

Teoretično bi zobniška dvojica nosila po vsej širini zoba. Da dobimo lokalizirano nošenje, nagibamo frezalo med obdelavo za majhen kot pravokotno na ravnino ploskega zobnika. Tako dobimo na obeh koncih zoba nekoliko večjo globino zobne vrzeli in s tem nekoliko tanjši zob ter tudi nošenje na sredini zoba. Tako torej lahko vnaprej natančno določamo velikost in mesto lokaliziranega nošenja.

Teoretično je ta postopek natančen le za delilno ravnino ploskega zobnika oziroma za razdelbni stožec obdelovanca. Ker pa frezalo reže tudi nad in pod razdelbno ravnino, odreže na vzožju in vrhu zoba nekaj več materiala, kakor bi ustrezalo teoretični obliki zoba. Zato dobimo po višini izbočen zob. To je pravzaprav celo ugodno, če si pokličemo v spomin izvajanja v poglavju 1.01.

(Konec prihodnjič)

Avtorjev naslov: Pavle Smarčan, dipl. ing.,
Višja tehniška šola
v Mariboru

POROČILA

DK 621.175.3(047)

VIHAR ZRUŠIL HLADILNE STOLPE

Po zadnjem večletnem razvojnem načrtu grade v Veliki Britaniji tipske termoelektrarne v velikosti 4 × 500 = 2000 MW. Prva te vrste je termoelektrarna Ferrybridge C. Njen prvi blok bi bil stekel ob koncu preteklega leta, če se ne bi bila dogodila nenavadna nezgoda.

Termoelektrarna ima obtočno hlajenje. Vsak od štirih blokov ima po dva hladilna stolpa. Stolpi stoje v skupini 2 × 4. Konstrukcija stolpov je običajna hiperboloidna, z betonskim kaminom. Premer stolpov pri tleh je 90 m, visoki pa so po 115 m.

Prvega novembra (1965) je pihal silen veter, katerega sunki so dosegli hitrost do okrog 160 km/h. V tem vetru so se zrušili drug za drugim kamini treh sosednih stolpov, ki so stali v smeri vetra v drugi vrsti, tedaj navidez nekoliko v zatišju. Redke priče dogodka pripovedujejo, da so stolpi pred porušitvijo drgetali in zveneli. Očitno je, da jih je veter (ali vrtinci od stolpov pred njimi?) spravil v resonančno nihanje, ki ga niso vzdržali. Ob nesreči so ruševine laže ranile tri delavce. Sreča v nesreči je namreč bila, da se je to zgodilo ravno med odmorom za kosilo.

Kaže, da bo nezgoda pri tej prvi tipski termoelektrarni ne le sprožila natančnejši študij dinamične trdnosti hiperboloidnih hladilnih stolpov, temveč tudi podprla težnje, da bi uvedli nove oblike kaminov.

(Engineering, London, št. 5194)

Boris Černigoj