

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ VÝROBY ČELNÍHO OZUBENÍ

ANALYSSIS OF MODERN TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION OF SPUR GEARS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ VEJREK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, CSc.

BRNO 2008

ABSTRAKT

Analýza moderních technologií výroby čelního ozubení s porovnáním a vyhodnocením. Popis jednotlivých technologií a metod při výrobě čelního ozubení, s konstrukčními prvky čelního ozubení a porovnání vhodnosti použití metod, nástrojů a strojů.

Klíčová slova

Ozubení, ozubená kola, nástroj, obrobek, technologie, metody, stroj

ABSTRACT

Analysis of modern technology for production spur gearing with comparison and evaluation. Description single technology and methods at production spur gearing, with constructional elements spur gearing and comparison fitness using methods, tools and tool grinder and sharpener.

Key words

Gearing, cog wheels, tool, work-piece, technologies, method, machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VEJREK, Tomáš. *Analýza moderních technologií výroby čelního ozubení: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 43 s., 0 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Analýza moderních technologií výroby čelního ozubení vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 23. 5. 2008

.....
Tomáš Vejrek

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčíkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod.....	7
1 Druhy ozubení a jejich použití.....	9
1.1 Čelní (válcová) ozubení.....	9
1.1.1 Čelní (válcová) ozubení s přímými zuby.....	9
1.1.2 Čelní (válcová) ozubení se šikmými zuby.....	9
1.1.3 Čelní (válcová) ozubení se šípovými zuby.....	10
1.2 Kuželová ozubení.....	10
1.2.1 Kuželová ozubení s přímými zuby.....	10
1.2.2 Kuželová ozubení se šikmými a zakřivenými zuby.....	10
1.3 Šroubová soukolí.....	11
1.3.1 Šroubová soukolí válcová a šroubová soukolí kuželová (hypoidní).....	11
1.4 Šneková soukolí.....	12
2 Konstrukční prvky čelních ozubení.....	13
2.1 Teorie čelního ozubení.....	13
2.2 Interference boků zubů.....	15
2.3 Tolerované rozměry a kontrolní míry.....	16
2.3.1 Kontrolní rozměr přes zuby čelních ozubených kol s přímými zuby.....	16
2.3.2 Kontrolní rozměr přes zuby čelních ozubených kol se šikmými zuby.....	17
2.3.3 Kontrolní rozměr zubů v konstantní tloušťce a výšce.....	18
2.3.4 Kontrolní rozměr zubů přes válečky.....	19
2.4 Měřicí stanice.....	21
3 Technologie a metody výroby čelních ozubení.....	22
3.1 Výroba čelních ozubení frézováním.....	22
3.1.1 Frézování dělicím způsobem.....	22
3.1.2 Frézování odvalovacím způsobem.....	23
3.2 Výroba čelních ozubení obrážením.....	24
3.2.1 Odvalovací obrázení hřebenovým nožem.....	24
3.2.2 Odvalovací obrázení kotoučovým nožem.....	24
3.3 Výroba čelního ozubení protahováním.....	25
3.4 Dokončovací metody obrábění.....	25
3.4.1 Ševingování.....	25
3.4.2 Tvrdé frézování (loupání).....	26
3.4.3 Broušení.....	26
3.4.4 Broušení do plna.....	27
3.4.5 Lapování.....	27
4 Stroje nástroje a řezné podmínky používané u jednotlivých metod.....	28
4.1 Modernizace ve strojovém parku.....	28

4.2 Nástroje na obrábění ozubení a jejich materiály.....	30
4.3 Stroje používané u jednotlivých metod obrábění.....	32
4.4 Řezné rychlosti při odvalovacím frézování.....	34
5 Porovnání s vyhodnocením.....	36
5.1 Porovnání vhodnosti použití jednotlivých metod obrábění.....	36
5.2 Porovnání vhodnosti použití dokončovacích metod obrábění.....	37
Závěr.....	39
Seznam použitých zdrojů.....	40
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	42

ÚVOD

Ozubená kola neodmyslitelně patří k základním symbolům strojírenství. Jejich návrhem a výrobou se lidstvo zabíralo již před staletími. Jejich nenahraditelnost je způsobena požadavkem přenášet a transformovat mechanickou energii. Ať už u mlýnských kol poháněných vodou, nebo u moderní převodovky používané v automobilovém průmyslu, je jedním ze základních prvků právě ozubené kolo. Výroba ozubených kol prošla za svoji existenci velkým množstvím proměn. Konstrukce ozubeného kola je velmi složitý proces, jehož složitost je úzce spjata s rostoucími požadavky spotřebitele. Největší pokrok zaznamenala výroba ozubených kol v modernizaci strojového parku a výrobě nástrojů, čímž stoupla i produktivita jednotlivých metod obrábění.

Produktivita při výrobě ozubených kol je přímo závislá na strojovém vybavení jednotlivých firem. Nástroje na výrobu ozubených kol již v dnešní době představují širokou paletu sortimentu, ze kterého mohou jednotlivé firmy vybírat. Tyto nástroje a vhodnost jejich použití pak také ovlivňují výrobní produktivitu. Otázka volby nástroje však nezáleží pouze na jeho vhodné volbě, ale důležitým faktorem je zde i cena. Nástroje na výrobu ozubení jsou velice nákladné a proto je důležité zvolit nástroj tak, aby vyhovoval dané výrobě a při tom nadbytečně nezasahoval do ceny výrobku. Stejně tak volba vhodného stroje je velice důležitým faktorem. Moderní CNC centra jsou dnes špičkově vybavené stroje, avšak důležitou roli zde hrají opět náklady. Důležité je zvolit stroj tak, aby vyhovoval výrobním požadavkům a zároveň byl rovnoměrně zatížen ve výrobním procesu.

Moderní technologie výroby čelních ozubení jsou přímo závislé na moderních strojích a nástrojích. Pokrok ve výrobě ozubených kol je dán pokrokem ve vybavení strojového parku. Vzhledem k tomuto vývoji jsou dnešní CNC obráběcí centra schopny s vysokou produktivitou obrábět různé druhy ozubení za poměrně krátké časy.

Tato práce se zabývá jednotlivými technologiemi výroby čelního ozubení, jejich konstrukčními prvky a použitím jednotlivých strojů a nástrojů u těchto metod. Porovnává produktivitu jednotlivých metod obrábění a dává obecný přehled o metodách používaných v dnešní době, při výrobě ozubených kol.

1 DRUHY OZUBENÍ A JEJICH POUŽITÍ

Dříve než si začneme popisovat jednotlivé druhy ozubení, popíšeme základní zákon ozubení. Ten vychází z požadavku na trvalý záběr boku zubů a na zachování konstantního převodu. (1)

Zní:

Ke splnění plynulého záběru dvou boků zubů je nezbytné dosažení stálého převodového čísla, to znamená konstantního poměru úhlových rychlostí spolu zabírajících ozubených kol. To je však možné pouze tehdy, když společná normála obou boků zubů prochází nehybným, *valivým bodem P*. (23)

Ozubení je obecně rozděleno na ozubení čelní (válnová), ozubení kuželová, ozubení šroubová a ozubení šneková.

1.1 Čelní (válnová) ozubení

K vytvoření kinematické a silové vazby mezi rovnoběžnými hřídeli, slouží čelní (válnová) soukolí. U většiny převodovek velkých výkonů se především používají předlokové redukční převodovky s čelním ozubením. Tyto převodovky zvyšují převodový poměr a s tím i účinnost převodovky. (1)

Ze základního zákona ozubení vyplývá, že základním stavebním prvkem ozubených převodů je profil boku zubu. (1)

1.1.1 Čelní (válnová) ozubení s přímými zuby

Geometricky nejjednodušší, nejméně pevné, nejhluchnější.

1.1.2 Čelní (válnová) ozubení se šikmými zuby

Pevnější, tišší chod vyvozují axiální síly na ložiska.



Obr. 1.1 Čelní ozubení s přímými zuby (17)



Obr. 1.2 Čelní ozubení se šikmými zuby (17)

1.1.3 Čelní (válcová) ozubení se šípovými zuby

Pevné, tiché, ruší axiální síly, dražší výroba.



Obr. 1.3 Čelní ozubení se šípovými zuby (6)

Mezi soukolí s rovnoběžnými hřídeli patří také soukolí s *vnitřním ozubením* a soukolí s *ozubeným hřebenem*.



Obr. 1.4 Soukolí s vnitřním ozubením (11)



Obr. 1.5 Soukolí s ozubeným hřebenem (12)

1.2 Kuželová ozubení

K vytvoření kinematické a silové vazby mezi různoběžnými hřídeli, slouží valivá soukolí s kuželovými koly. Velmi často se používají pro úhel os 90° . Dvojice komolých kuželů patního a hlavového (mezi nimi kužel roztečný), tvoří geometrický základ kuželového soukolí. (1)

1.2.1 Kuželová ozubení s přímými zuby

Nejběžnější pro méně náročné převody, neklidný chod, hlučnost, levnější výroba.

1.2.2 Kuželová ozubení se šikmými a zakřivenými zuby

Menší citlivost na výrobní nepřesnosti, klidnější, tišší chod, vyšší pevnost a trvanlivost ozubení, nákladná výroba, používají se pro jednoúčelové stroje.



Obr. 1.6 Kuželové ozubení s přímými zuby (17)



Obr. 1.7 Kuželové ozubení se zakřivenými zuby (17)

1.3 Šroubová soukolí

K vytvoření kinematické a silové vazby mezi mimoběžnými hřídeli slouží šroubová soukolí. Mají nižší účinnost, proto nemají většího významu. Pomocí nejkratší příčky (osy) mimoběžek a úhlu mimoběžek lze určit vzájemnou polohu mimoběžných os. Základní tělesa převodu se po sobě odvalují a současně posouvají, čímž vzniká šroubový pohyb. (1, 3)

1.3.1 Šroubová soukolí válcová a šroubová soukolí kuželová (hypoidní)

Šroubová soukolí válcová se uplatňují v místě, kde je nejkratší úhlopříčka mimoběžných os a kde lze tvar hyperboloidních těles s určitou přibližností nahradit kruhovými válci. (1)

Šroubová soukolí kuželová (hypoidní) se uplatňují v oblastech, kde se hyperboloidy nahradí komolými kužely. (1)

U obou těchto případů přechází přímkový dotyk v dotyk bodový. (1)



obr. 1.8 Šroubová soukolí kuželová (18)

1.4 Šneková soukolí

Speciálním případem šroubového válcového soukolí jsou šneková soukolí. Snížením počtu zubů pastorku přejde v jednochodý nebo vícechodý šroub, nebo-li šnek. (1)

Protikolo šneku se nazývá šnekové kolo. (1)

Šneková soukolí se podle tvaru základních těles dělí na:

- soukolí válcová (obyčejná)
- válcový šnek + globoidní šnekové kolo
- globoidní šnek + válcové kolo
- globoidní šnek + globoidní kolo
- šnek + šnekový hřeben (zvláštní limitní případ) (1)



Obr. 1.9 Šnekové soukolí (17)

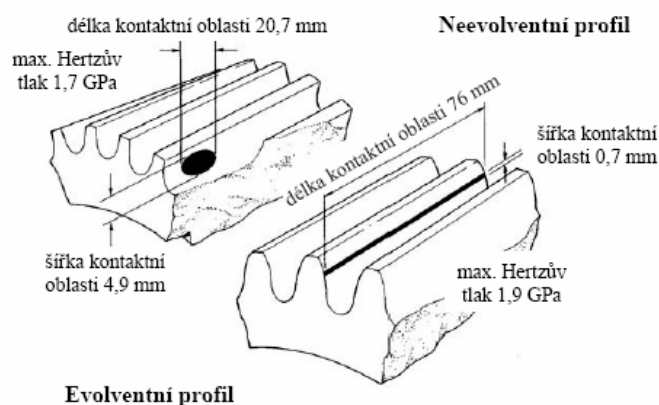
2. KONSTRUKČNÍ PRVKY ČELNÍCH OZUBENÍ

2.1 Teorie čelního ozubení

Teorie čelního ozubení představuje soubor poznatků o kinematice, geometrii a záběrových vlastnostech čelních soukolí s přímými zuby. (23)

Téměř výhradně se ve strojírenství používá ozubení kde mají boky zubů tvar evolventy. (23)

Evolventní tvar zubu splňuje požadavky na konstantní převodový poměr, relativně jednoduchou výrobu a nízké ztráty třením. (23)



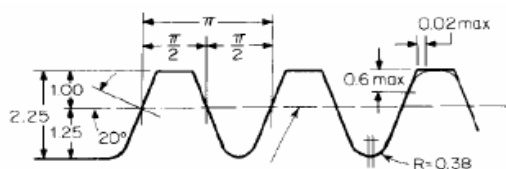
Obr. 2.1 Evolventní ozubení (23) Obr. 2.2 Kontaktní oblasti u různých tvarů zubů (23)

Ozubení je definováno soustavou proporcí, nebo-li součinitelů které popisují základní profil základního ozubeného hřebene, a úhlem záběru $\alpha = 20^\circ$. Počet zubů u ozubeného hřebene neovlivňuje tvar boků. Evolventní profily boků zubů ozubeného hřebene přecházejí v přímky.

Násobením modulem m ze základního ozubeného hřebene jsou odvozeny všechny délkové rozměry hřebenového nástroje. (21)



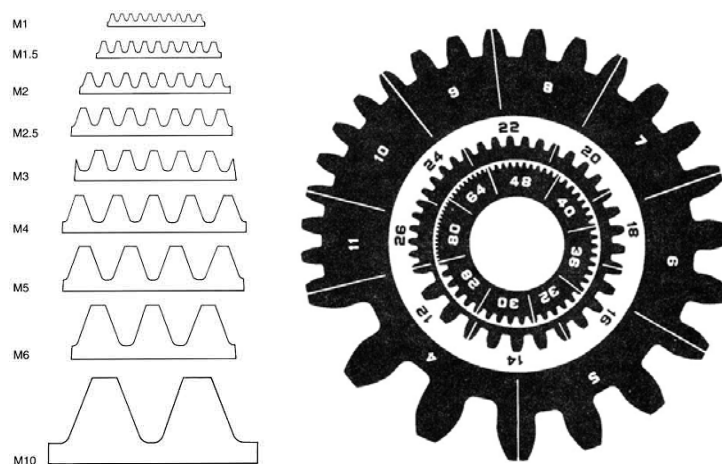
Obr. 2.3 Hřebenový nástroj (21)



součinitel výšky hlavy zubu $h_a^* = 1$
 součinitel radiální vůle $c^* = 0,25$
 součinitel výšky paty zubu $h_f^* = 1,25$
 součinitel poloměru zaoblání $r_f^* = 0,38$

Obr. 2.4 Základní profil podle ISO 53:1974 (21)

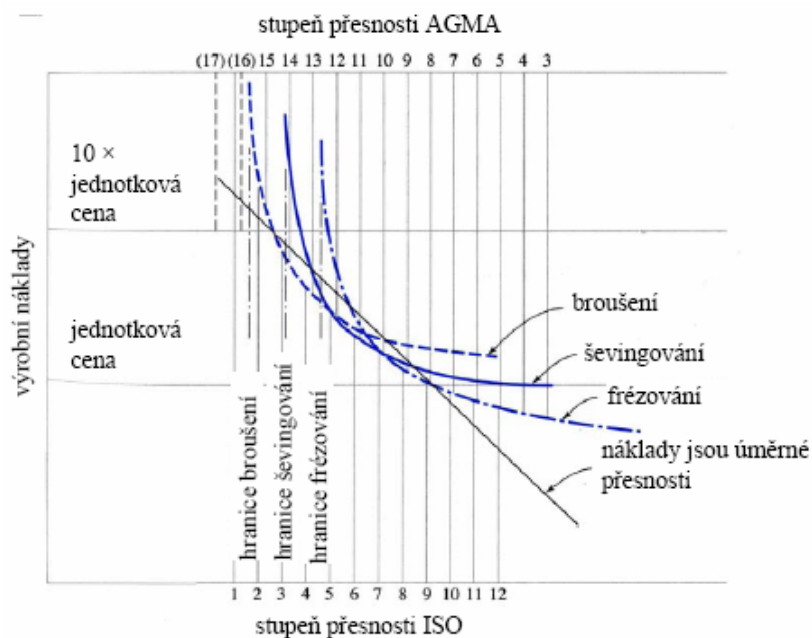
Komerčně jsou běžně dostupné hřebenové nástroje s moduly 1; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 32; 40; 50 mm.



obr. 2.5 Velikost zubů versus modul (21)

Souhrnem kinematické přesnosti, plynulosti chodu a dotykem zubů je dán stupeň přesnosti ozubení. (21)

ČSN - ISO, resp. DIN třídí ozubená kola do 12 stupňů přesnosti. (21)



Obr. 2.6 Výrobní náklady v závislosti na stupni přesnosti (21)

Tab. 2.1 Stupně přesnosti a některé příklady použití (23):

IT	STUPNĚ PŘESNOSTI DLE ISO	PŘÍKLADY POUŽITÍ
2 až 3	nejvyšší dosažitelná přesnost	zkušební kola
4 až 5	vysoká přesnost	letecké převody
6 až 7	střední vyšší přesnost	průmyslové převody
8 až 9	střední přesnost	automobilové převodovky
10 až 11	nízká přesnost	pomaluběžné převody
12	velmi nízká přesnost	zemědělská zařízení

2.2 Interference boků zubů

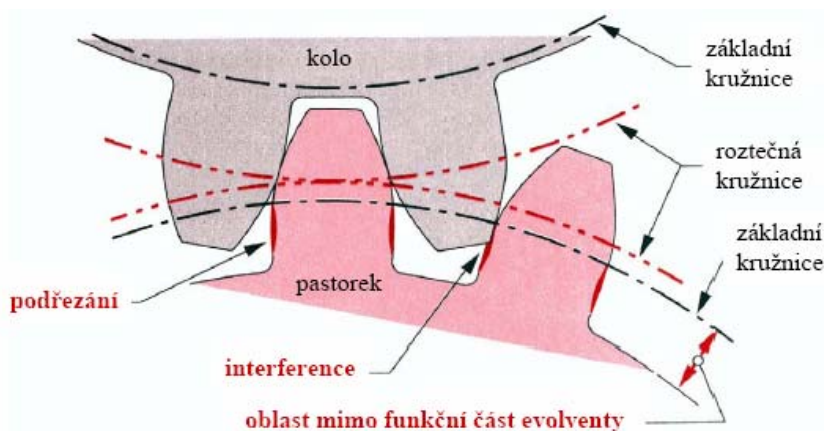
Kolize částí boků zubů spoluzabírajících kol se nazývá interference. K nejčastějšímu případu interference dochází, když záběr hlavy zubu v patě zubu protikola nastane mimo funkční část evolventy. K tomuto jevu dochází i při výrobě ozubeného kola, kdy zaoblení hlavy zubu nástroje podřezává patu zubu kola.

Tento jev působí velice nepříznivě při namáhání zubů kola ohybem, a to zeslabením paty zubu kola. (23)

Minimální počet zubů při kterém nedojde k podřezání (23):

$$z_{\min} = \frac{2}{\sin^2 \alpha} \quad (2.1)$$

Pro úhel záběru $\alpha = 20^\circ$ je minimální počet zubů $z_{\min} = 17$.



Obr. 2.7 Interference boků zubů (23)

2.3 Tolerované rozměry a kontrolní míry

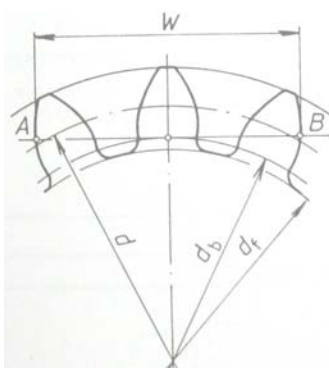
2.3.1 Kontrolní rozměr přes zuby čelních ozubených kol s přímými zuby

Nejobvyklejší způsob měření je kontrola rozměru přes zuby. (3)

Výhody: Jednoduché měřidlo, možnost měření přímo na stroji, nezáleží na přesnosti hlavové kružnice (3)

Nevýhoda: Závisí na počtu zubů kola (3)

Pro dané rozměry a stupeň přesnosti se mezní úchytky rozměru přes zuby určí podle ČSN 01 4682. (3)



Obr. 2.8 Kontrolní rozměr přes zuby (3)

Rozměr přes zuby pro kola N (3):

$$W = W_1 \cdot m \quad (2.2)$$

kde:

W_1 [mm] jednotkový rozměr přes zuby;

m [-] modul;

Rozměr přes zuby pro kola $\pm V$ (3):

$$W = W_1 \cdot m \pm 2xm \cdot \sin \alpha, \quad (2.3)$$

kde:

W_1 [mm] jednotkový rozměr přes zuby; α [°] úhel sklonu zubu;

m [-] modul;

x [mm] jednotkové posunutí;

Jednotkový rozměr přes zuby pro $m = 1$ (3):

$$W_1 = 2,952131 \cdot (z' - 0,5) + 0,014005z \quad (2.4)$$

kde:

z [-] počet zubů měřeného kola;

z' [-] počet zubů, přes které se měří;

2.3.2 Kontrolní rozměr přes zuby čelních ozubených kol se šikmými zuby

Tento způsob kontroly lze použít pouze tehdy, je-li šířka ozubení $b > W \cdot \sin \beta$. (3)

Jmenovitý rozměr přes zuby (3):

$$W = m \cdot [\pi \cdot \cos \alpha_n \cdot (z' - 0,5) + z \cdot \cos \alpha_n \operatorname{inv} \alpha_t] \quad (2.5)$$

kde:

m [-] modul;

α_t [°] čelní úhel profilu;

z [-] počet zubů měřeného kola;

α_n [°] normální úhel profilu;

z' [-] počet zubů, přes které se měří;

π [-] Ludolfovo číslo $\pi = 3,14159$;

Počet zubů přes které se měří (zaokrouhluje se na celá čísla) (3):

$$z' = \frac{z \cdot \alpha_n^0}{180^\circ \cdot \cos \beta \cdot \cos^2 \beta_b} \quad (2.6)$$

kde:

α_n [°] normální úhel profilu;

β [°] úhel sklonu zubů;

z [-] počet zubů měřeného kola;

β_b [°] úhel sklonu zubů na základním válci;

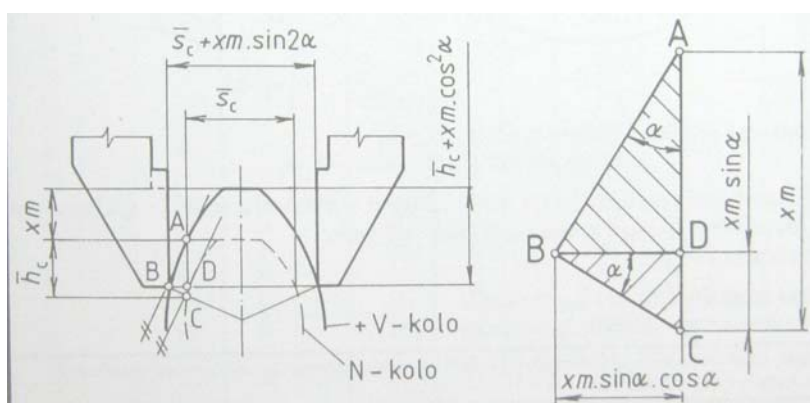
2.3.3 Kontrolní rozměr zubů v konstantní tloušťce a výšce

Dle ČSN 01 4678. Tento druh měření se nejčastěji používá u kuželových a šnekových kol s přímými evolventními zuby. (3)

U čelních kol s přímými, šikmými nebo šípovými zuby používáme tuto metodu pouze tehdy nemůžeme-li měřit rozměr přes zuby. K tomu dochází např. u kol s přímými zuby a velkým stoupáním. (3)

Výhody: Nezáleží na počtu zubů, jednoduché měřidlo, možnost měřit přímo na stroji.

Nevýhoda: Závisí na přesnosti průměru hlavové kružnice. (3)



Obr. 2.9 Kontrolní rozměr zubů v konstantní tloušťce a výšce (3)

Tloušťka zubů na konstantní tětivě $\bar{s}_c$, pro kola N (3):

$$\bar{s}_c = 0,5\pi \cdot m \cdot \cos^2 \alpha, \quad (2.7)$$

kde:

α [°] úhel sklonu zubu;

m [-] modul;

π [-] Ludolfovo číslo;

Tloušťka zubů na konstantní těživě $\bar{s}_c$, pro kola $\pm V$ (3):

$$\bar{s}_c = 0,5\pi \cdot m \cdot \cos^2 \alpha \pm xm \cdot \sin 2\alpha \quad (2.8)$$

kde:

α [°] úhel sklonu zubu;

x [mm] jednotkové posunutí;

m [-] modul;

π [-] Ludolfovo číslo; $\pi = 3,14159$;

Konstantní výška zubu $\bar{h}_c$, pro kola N (3):

$$\bar{h}_c = m \cdot (1 - 0,25\pi \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha) \quad (2.9)$$

kde:

α [°] úhel sklonu zubu;

m [-] modul;

π [-] Ludolfovo číslo; $\pi = 3,14159$;

Konstantní výška zubu $\bar{h}_c$, pro kola $\pm V$ (3):

$$\bar{h}_c = m \cdot (1 - 0,25\pi \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha) \pm xm \cdot \cos^2 \alpha \quad (2.10)$$

kde:

α [°] úhel sklonu zubu;

x [mm] jednotkové posunutí;

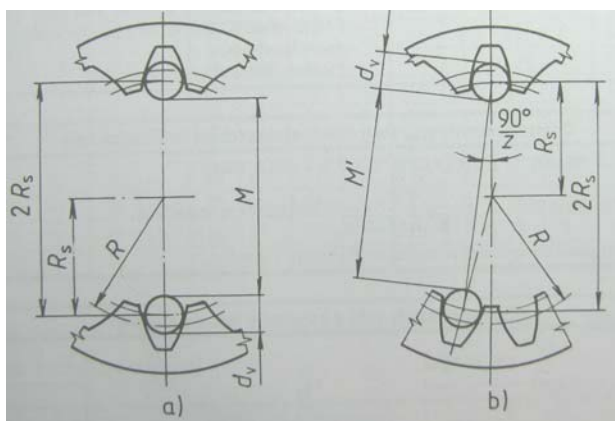
m [-] modul;

π [-] Ludolfovo číslo; $\pi = 3,14159$;

2.3.4 Kontrolní rozměr zubů přes válečky

Tato metoda měření je velmi vhodná pro měření vnitřního ozubení. Používá se pro počet zubů kol $z > 20$. (3)

Můžeme s ní však měřit i vnější ozubení. (3)



Obr. 2.10 Kontrolní rozměr zubů přes válečky (3)

Jmenovitý rozměr přes válečky při sudém počtu zubů (3):

$$M = 2R_s - d_v \quad (2.11)$$

kde:

R_s [mm] poloměr kružnice od středu kola ke středu válečku;

d_v [mm] průměr válečku nebo kuličky;

Jmenovitý rozměr přes válečky při lichém počtu zubů (3):

$$M' = 2R_s \cdot \cos(90^\circ - z) - d_v \quad (2.12)$$

kde:

R_s [mm] poloměr kružnice od středu kola ke středu válečku;

z [-] počet zubů měřeného kola; d_v [mm] průměr válečku nebo kuličky;

Průměr válečku, nebo kuličky (3):

$$d_v = \frac{\pi \cdot m \cdot \cos \alpha}{2 \pm 2x \cdot m \cdot \sin \alpha} \quad (2.13)$$

kde:

α [°] úhel sklonu zubu;

x [mm] jednotkové posunutí;

m [-] modul;

π [-] Ludolfovo číslo; $\pi = 3,14159$;

Pro libovolný d_v se vypočítá R_s (3):

$$R_s = \frac{d_b}{2 \cos \alpha_D} \quad (2.14)$$

kde:

α_D [°] úhel tlaku na kružnici o poloměru R_s ;

d_b [mm] průměr základní kružnice;

Úhel tlaku na kružnici o poloměru R_s (3):

$$\text{inv} \alpha_D = \frac{d_v}{d_b} + \text{inv} \alpha + \frac{s}{d} - \frac{\pi}{z} \quad (2.15)$$

kde:

d_b [mm] průměr základní kružnice; α [°] úhel sklonu zubu;

d_v [mm] průměr válečku nebo kuličky; s [mm] tloušťka zubu;

z [-] počet zubů měřeného kola; π [-] Ludolfovo číslo; $\pi = 3,14159$;

kde $s = 0,5 \cdot \pi \cdot m \pm 2xm \cdot \text{tg} \alpha$ d [mm] průměr roztečné kružnice;

2.4 Měřicí stanice

V dnešní době se zabývá velké množství firem výrobou měřících přístrojů a kompletním vybavením celých měřících stanic. Na obr. 2.11 a 2.12 jsou zobrazeny měřicí stanice používané ve firmě IG-Watteuw, zabývající se výrobou ozubení a převodových systémů. Měří zde tvar evolventy, úhel sklonu zubů a rozměr přes zuby. (24)



Obr. 2.11 Měřicí stanice Klingelnberg P65 (24)



Obr. 2.12 Měřicí stanice Höfler EMZ 631 (24)

3. TECHNOLOGIE A METODY VÝROBY ČELNÍCH OZUBENÍ

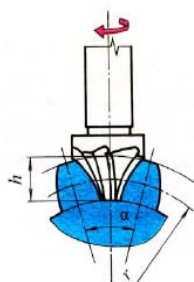
Obrábění ozubení je velice složitý proces, který úzce souvisí s požadavkem na spolehlivý odval hotového soukolí. Dosahovanou přesnost při obrábění ozubení ovlivňuje mnoho parametrů. Mezi nejdůležitější patří řezné prostředí, nástroj, způsob upnutí obrobku, technologie základny. (2)

Z celkové pracnosti ozubeného kola tvoří obrábění ozubení u čelních ozubených kol zhruba 50 až 60% z celkové pracnosti ozubeného kola. Z toho časy vedlejší činí 30 až 70%. (7)

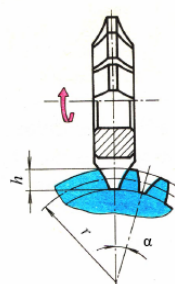
3.1 Výroba čelních ozubení frézováním

3.1.1 Frézování dělicím způsobem

Čelní ozubená kola s přímými zuby se frézují čepovou nebo kotoučovou modulovou frézou.

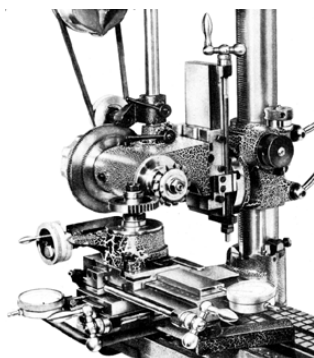


Obr. 3.1 Čepová fréza (21)



Obr. 3.2 Kotoučová fréza (21)

Při frézování dělicím způsobem se profily zubových mezer obrábí postupně jedna zubová mezera za druhou a to tvarovou frézou. Výrobní náklady jsou poměrně vysoké, protože pro každou velikost ozubení potřebujeme speciální nástroj. Kotoučové modulové frézy se vyrábí pro moduly $m = 0,2$ až 16 mm. Při frézování šikmých zubů je pracovní stůl stroje s obráběným ozubeným kolem natočen o úhel sklonu zubu β_k vzhledem k ose vřeten. Frézování šikmého ozubení za použití čepové frézy je analogické, avšak pracovní stůl se nenatáčí. Za použití čepové modulové frézy můžeme obrábět i šípové ozubení. (21, 2)



Obr. 3.3 Frézka s dělicím přístrojem (21)



Obr. 3.4 Nástroje na výrobu ozubení (21)

3.1.2 Frézování odvalovacím způsobem

Odvalovací fréza má tvar evolventního šneku. Její profil je tvořen v normálové rovině základním hřebenem. Nástroj (odvalovací fréza) představuje spolu s obráběným kolem záběr šroubového soukolí. Tato technologie obrábění je především vhodná na výrobu čelních a šnekových ozubených kol. Při jednom otočení frézy se obrobek pootočí o jednu rozteč. Obalové plochy jednotlivých poloh nástroje vytvářejí boky zubů. Jednou odvalovací frézou můžeme obrábět stejné moduly ozubených kol s různým počtem a sklonem zubů. (21, 2)

Kinematika řezného pohybu vychází z podmínky (2):

$$\frac{n_k}{n_f} = \frac{z_f}{z_k} \quad (3.1)$$

n_k [min^{-1}] otáčky obráběného kola; z_k [-] počet zubů obráběného kola;
 n_f [min^{-1}] otáčky odvalovací frézy; z_f [-] počet chodů odvalovací frézy;

Při obrábění kol se šikmými zuby je úhel nastavení odvalovací frézy (2):

$$\eta_f = \beta_k \pm \omega_f \quad (3.2)$$

β_k [$^\circ$] úhel sklonu zubů obráběného kola; ω_f [$^\circ$] úhel sklonu šroubovice frézy;

Moderní odvalovací CNC frézky, které mají řízení ve 3 směrech a ve třech osách, se vyrábí se samostatnými servopohony, které mají elektronickou polohovou vazbu. Tyto frézky jsou schopny obrábět ozubená kola s velkou přesností a poměrně vysokou produktivitou. (4)



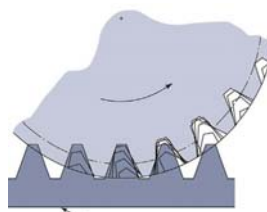
Obr. 3.5 CNC obrábění (5)

3.2 Výroba čelních ozubení obrážením

Při výrobě čelního ozubení obrážením používáme odvalovací způsob obrábění, a to za pomoci kotoučového nože, nebo ozubeného hřebene.

3.2.1 Odvalovací obrázení hřebenovým nožem

Na principu záběru základního hřebene s ozubeným kolem je založen odvalovací pohyb mezi obráběným ozubeným kolem (obrobkem) a nástrojem. Tato metoda je vhodná pro obrábění vnitřního i vnějšího ozubení čelních ozubených kol s přímými zuby, ale i šikmými a šípovými zuby. Ozubený hřeben (nástroj) koná přímočarý vratný pohyb. Složením otáčivého a posuvného pohybu obrobku je dosaženo odvalování. Nástroj se vřezává do obrobku a je nastaven na hloubku zubu. Délkou hřebenového nástroje je dán počet obrobených zubových mezer. Tento systém obrábění je označován jako *Maag* (21, 2)



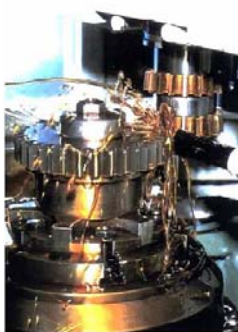
Obr. 3.6 Obrázení hřebenovým nožem (18)

3.2.2 Odvalovací obrázení kotoučovým nožem

Při obrázení se nástroj i obrobek po sobě odvalují tak, jako by spolu zabírala dvě čelní ozubená kola. Princip odvalování je založen na vzájemném odvalování dvou ozubených kola a to bez vůle. Obálka evolventních boků zubů obrázečícího kotouče pak tvoří výsledný evolventní profil. Nástroj je upnutý ve smýkadle a koná zároveň přímočarý vratný pohyb. Kotoučové nože mohou být stopkové nebo nástrčné. (21, 2)

Rozsah použití při obrázení kotoučovým nožem je $m < (12-15)$ mm. Maximální průměr obráběného ozubeného kola je zhruba do 1200 mm (záleží na typu stroje). (4)

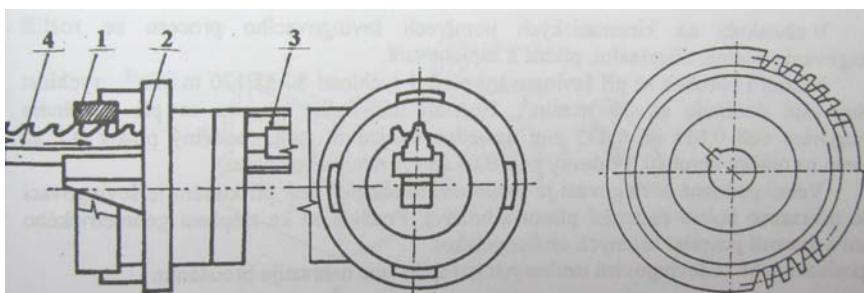
Při obrázení šikmého ozubení se používá stejný nástroj, ten se během obrábění za pomoci šroubových vodítek natáčí pod úhlem sklonu zubů. Tento systém obrábění je označován jako *Fellows*. (2)



Obr. 3.7 Obrázení kotoučovým nožem (22)

3.3 Výroba čelních ozubení protahováním

Protahování se používá při hromadné a velkosériové výrobě vnitřního i vnějšího ozubení. Pro každý tvar zubu, modul nebo průměr ozubeného kola je zapotřebí speciálního nástroje. Kalibrovací část nástroje má přesný tvar zubové mezery obráběného ozubeného kola. Výsledná přesnost ozubení je závislá na přesnosti protahovacího stroje. Nástrojem je zpravidla monolitní protahovací trn, pro větší moduly se používá skládaný. Stroj je vybaven dělicím přístrojem, který po protažení jedné zubové mezery pootočí o jednu zubovou rozteč. (2)



Obr. 3.8 Vlevo protahování vnitřního ozubení, vpravo kruhový protahovací trn (2)

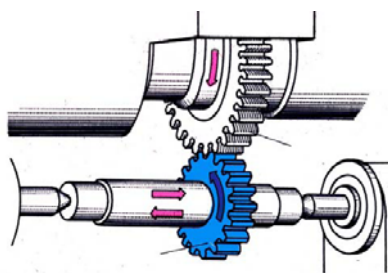
Popis k obrázku 3. 8

1 – obráběné kolo; 2 – otočná hlava; 3 – tažné ústrojí; 4 – protahovací nástroj; (2)

3.4 Dokončovací metody obrábění

3.4.1 Ševingování

Ševingování je založeno na principu záběru dvou šikmozubých ozubených kol, jejichž osy jsou mimoběžné. Jedná se o dokončovací způsob tvaru zubu po obrázení, nebo frézování. Na nástroji jsou radiální řezné drážky, kterými je skluzem mezi nástrojem a obrobkem odebírán materiál. Ševingováním zlepšíme přesnost zhruba o 1 stupeň přesnosti dle ČSN-ISO nebo DIN. (21, 7)



Obr. 3.9 Obrábění ševingováním (21)



Obr. 3.10 Nástroj na ševingování (21)

3.4.2 Tvrdé frézování (loupání)

Jedná se o metodu, kdy se před chemicko-tepelným zpracováním ozubené kolo obrobí s přídavkem na obrábění 0,1-0,3 mm na bok zubu. Poté se kolo chemicko-tepelně zpracuje a pomocí nástroje ze slinutého karbidu frézuje (loupá). Tyto nástroje jsou schopny obrábět materiály až do tvrdosti 64 HRC. Tímto tvrdým frézováním se odstraňují deformace po chemicko-tepelném zpracování. Drsnosti povrchu touto operací dosahujeme až $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Při obrábění ozubených kol do $m = 3$ se používá loupání. Jedná se o záběr šroubových kol kde jedno kolo je nástroj a druhé obrobek. Nástroj vykonává při obrábění vůči obrobku axiální pohyb ve směru jeho osy, tímto způsobem se z boku zubu odebírá tříska po celé šířce ozubeného věnce. Tento způsob obrábění vyvinula firma Pfauter a využívá se hlavně v automobilovém průmyslu. (4)

3.4.3 Broušení

Broušení je dokončovací operace při výrobě kalených ozubených kol. Zuby se brousí buď tvarovým nástrojem ve tvaru jedné zubové mezery nebo odvalovacím broušením. (21)

Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči

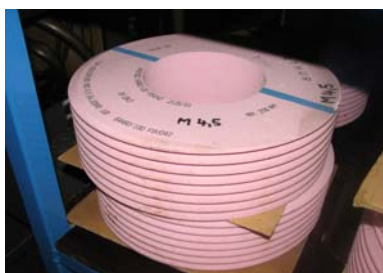
Nástrojem je brusný kotouč, který má tvar buď poloviny nebo celé zubové mezery a brousí jeden nebo oba protilehlé boky zubů najednou. Po obroušení jedné zubové mezery se dělicím zařízením posune o jednu rozteč a proces se opakuje. Brousicí kotouč se do tvaru zubní mezery orovnává diamantovou kladkou za pomoci programu. Tvarem brusného kotouče zajišťujeme profilovou modifikaci, podélnou modifikaci zajišťujeme trajektorií pohybu osy kotouče, která je dána programovým řízením. (4, 7)



Obr. 3.11 Tvarový brusný kotouč (24) Obr. 3.12 Broušení tvarovým kotoučem (24)

Kontinuální odvalovací broušení

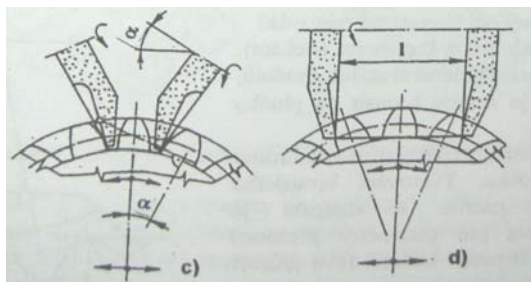
Tento způsob se používá v hromadné a sériové výrobě. V hojné míře se používá při výrobě různých druhů převodovek. Rozměry obráběných ozubených kol závisí na typu stroje, maximálně však zhruba do 800 mm. Broušení probíhá na principu záběru obráběného kola s nástrojem. Nástroj má tvar brusného šneku o velkém průměru. Základní profil nástroje vytváříme na obvodu brusného kotouče za pomoci orovnávacích diamantů. Tento systém se nazývá *Reishauer*. (4)



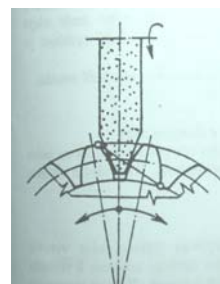
Obr. 3.13 Odvalovací brusný kotouč (24) Obr.3.14 Broušení odvalovacím kotoučem (24)

Diskontinuální odvalovací broušení

Systém *MAAG* je asi nejznámějším představitelem tohoto typu broušení. Broušené ozubené kolo zde vykonává odvalovací pohyb. Tento pohyb odpovídá valení základní kružnice obráběného kola po přímce. Dělicí mechanismus posune po obroušení celé šířky ozubení o jednu rozteč a proces se opakuje. (4)



Obr. 3.15 Broušení – systém MAAG (2)



Obr. 3.16 Broušení – systém Niles (2)

Na podobném principu fungují i brousicí stroje typu Niles obr. 3.16., kde odvalování boku zubu probíhá po jednom kotouči s lichoběžníkovým profilem. (2, 4)

3.4.4 Broušení do plna

Broušení do plna je speciální metodou broušení, kdy tvarovým brusným kotoučem, který má tvar zubové mezery, brousíme do plného materiálu. Obrobek se otáčí kolem své osy a brusný kotouč postupně ubírá materiál, čímž vytváří zubovou mezeru. Po otočení obráběného kola kolem své osy se brusný kotouč spustí o nastavenou hloubku úběru materiálu a proces se opakuje. Touto metodou dosahujeme vysokých rychlostí obrábění, až 100 m/s. Na podobném principu funguje i odvalovací způsob broušení do plna.

3.4.5 Lapování

Při lapování zlepšujeme pouze drsnost povrchu boků zubů, tvar evolventy se nám však téměř nemění. Lapované kolo je zpravidla v záběru s kolem litinovým, které má stejný modul. Litinové kolo je pak kolem hnaným a lapované kolo je kolem bržděným. Lapované kolo současně vykonává kmitavý pohyb ve směru osy a mezi soukolí je přiváděna speciální lapovací pasta. (2)

4. STROJE NÁSTROJE A ŘEZNÉ PODMÍNKY POUŽÍVANÉ U JEDNOTLIVÝCH METOD

Vývoj obráběcích strojů je velmi složitý proces, jehož cílem je zajistit progresivní obrábění na výkonných strojích při zachování vysoké přesnosti a jakosti povrchu součástí. V dnešní době představují číslíkově řízené obráběcí stroje CNC hlavní nosný prvek. Uplatňují se při středně-sériové, malosériové, ale i kusové výrobě. Tyto číslíkově řízené stroje daleko překračují funkci jednoho stroje a současně umožňují návaznost na ostatní prvky obráběcích systémů. (2)

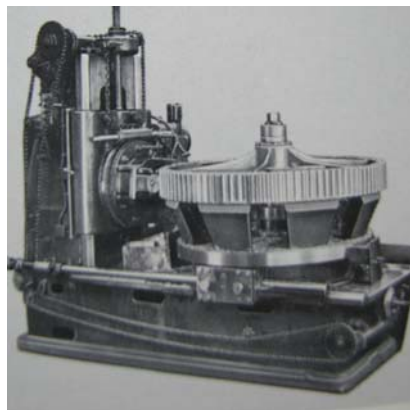


Obr. 4.1 CNC ovládací panel (24)

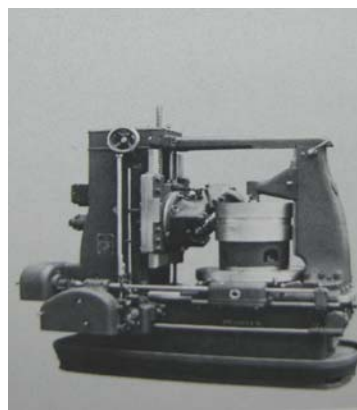
4.1 Modernizace ve strojovém parku

V dnešní době je velké množství různých firem a dodavatelů kompletních obráběcích center. Vhodná volba obráběcího stroje a nástroje je první krok k úspěšnému obrábění ozubení. V každé firmě by měl být odborník (specialista) na obrábění a vhodnou volbu nástroje.

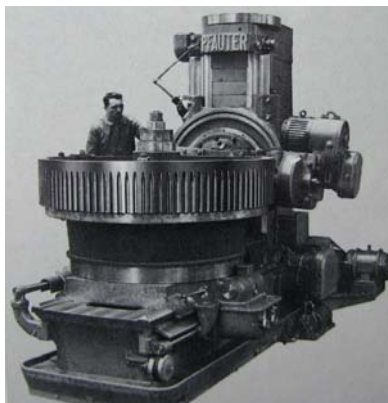
Vývoj obráběcích strojů (frézky) ve 20. a na začátku 21. století



Obr. 4.2 Pfauter R4 rok výroby 1908 (6)



Obr. 4.3 Pfauter RS2 rok výroby 1930 (6)



Obr. 4.4 Pfauter RS3 rok výroby 1938 (6)



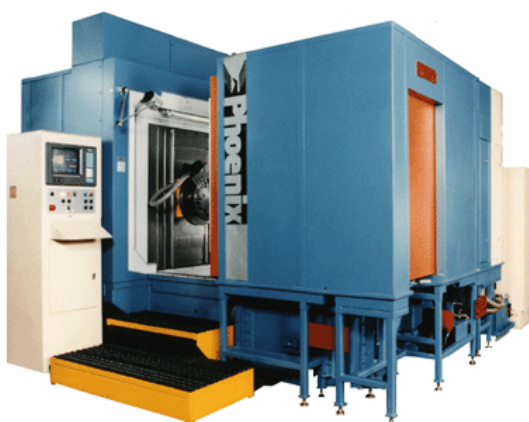
Obr. 4.5 TOS FO6 rok výroby 1960 (19)



Obr. 4.6 Pfauter P 251 rok výroby 1980 (19)



Obr. 4.7 Deckel FP 4 MA rok výroby 1988 (19)



Obr. 4.8 Phoneix 1000 HC rok výroby 2005 (20)



Obr. 4.9 CNC KB3120 rok výroby 2007 (15)

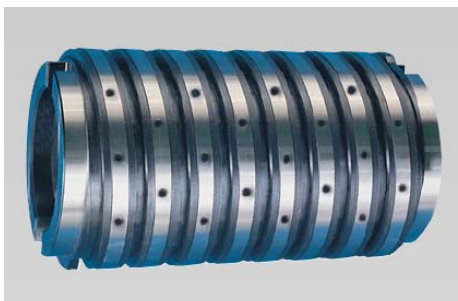
4.2 Nástroje na obrábění ozubení a jejich materiály

Rychlořezné oceli na výrobu frézovacích nástrojů

Standardním materiálem na výrobu frézovacích nástrojů je rychlořezná ocel. Příkladem takové je ocel s označením EMo5Co5. Při velmi náročných řezných podmínkách se používají rychlořezné oceli vyrobené práškovou metalurgií. (13)

Slinuté karbidy na výrobu frézovacích nástrojů

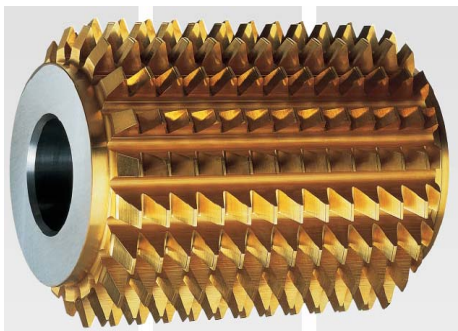
Technicky nejdůležitějším kovovým karbidem je karbid wolframu WC, dalším karbidem používaným na výrobu frézovacích nástrojů je karbid titanu TiC a karbid tantalu TaC. Nástroje z těchto materiálů se vyrábí práškovou metalurgií. Jako pojivo se používá kobalt. (14)



Obr. 4.10 Těleso frézy (13)



Obr. 4.11 Segment odvalovací frézy (13)



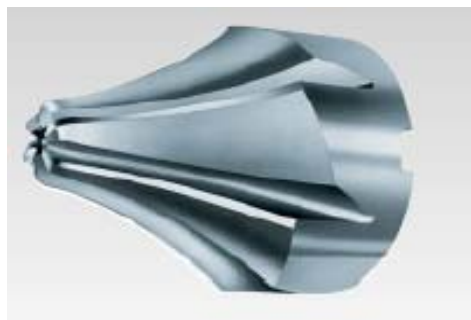
Obr. 4.12 Odvalovací fréza (13)



Obr. 4.13 Fréza s výměnnými destičkami (13)



Obr. 4.14 Kotoučová modulová fréza (13)



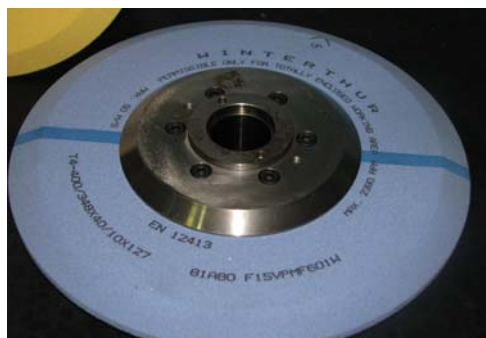
Obr. 4.15 Čepová fréza (13)

Brousicí materiály

Jako brousicí materiály používáme materiály z kubického nitridu bóru, diamant, dále brusiva na bázi kysličníku hlinitého Al_2O_3 a karbidu křemíku SiC . (2)



Obr. 4.16 Brusné kotouče (odvalovací) (24)



Obr. 4.17 Brusný kotouč (tvarový) (24)

Nástroj na ševingování (ševingovací kolo)

Ševingovací kolo zhotovené z materiálu S 590



Obr. 4.18 (vlevo) Ševingovací kolo pohled z boku (24)



Obr. 4.19 (vpravo) Ševingovací kolo pohled ze předu (24)

4.3 Stroje používané u jednotlivých metod obrábění

Svislá odvalovací frézka



Obr. 4.20 Frézka TOS OFA 32 CNC6 (16)

OFA 32 CNC 6 je svislá odvalovací frézka na výrobu ozubení. Frézka je určena pro frézování čelních ozubených kol s přímými i šikmými zuby, frézování řetězových kol a šnekových kol. Pro frézování radiálním i tangenciálním způsobem. Touto frézku se dají obrábět ozubená kola s podélnou modifikací. (16)

Svislá odvalovací obrážka



obr. 4.21 Obrážka TOS OHA 50 CNC 5 (16)

OHA 50 CNC 5 je svislá odvalovací obrážka s řídicím systémem SINUMERIK 840 D. Tento systém zajišťuje řízení v pěti osách. Je vybavena servopohony řízených os. Tento stroj je určený pro obrážení vnějšího i vnitřního ozubení čelních kol s přímými i šikmými zuby. (16)

Protahovací stroj

Obr. 4.22 Protahovací stroj Rausch HS 100 (9)

Rausch HS 100 je svislý protahovací stroj vybaven mechanickým pohonem do tažné síly až 100 kN, který je vybavený zakladačem, dělicím strojem a zařízením zajišťujícím zpětné vedení nástroje. Maximální průměr obrobku je 250 mm a maximální délka obrobku je 55 mm. (9)

Ševingovací stroj

Obr. 4.23 Ševingovací stroj RASO 200 CNC (10)

RASO 200 CNC je ševingovací stroj jehož konstrukce je řešena s ohledem na tuhost a co nejkratší kinematické řetězce. Tento stroj se vyrábí ve dvou velikostech a to pro obrobky do průměru 200 a 400 mm. Zaoblení a úkosu se dosahuje oscilací stolu, čímž je vyloučena nutnost vytvářet složitou kinematiku uvnitř ševingovací hlavy. CNC řízení tohoto stroje umožňuje variabilitu (dle úkolu obrábění) od 3 do 7 řízených os. Osa z (pro radiální přísuv) nástroje k ozubení má vyklonění pod úhlem 30°. (10)

Odvalovací/profilová bruska

Obr. 4.24 Bruska LIEBHERR LCS 300 (8)

LIEBHERR LCS 300 je bruska určena pro odvalovací nebo profilové broušení čelních kol, a to během jednoho upnutí obrobku. Tato technologie spojuje výhody jak broušení pomocí produktivního brusného šneku, tak broušení za pomoci tvarově přesného brusného kotouče. (8)

4.4 Řezné rychlosti při odvalovacím frézování

Řezné podmínky jsou velice důležitým parametrem při výrobě ozubených kol. Řezná rychlost je jedním z hlavních parametrů určujících produktivitu obrábění, která úzce souvisí s kvalitou obrobku. Cílem je dosáhnout co největší přesnosti a kvality obráběného materiálu za co nejmenší čas a cenu. V dnešní době je trh zásoben obrovským množstvím firem, které vyrábí a dodávají vysoce kvalitní nástroje. To je však závislé na ceně, která se zobrazí v celkovém řetězci výroby ozubeného kola, počínaje konstrukcí, přes výrobu, až po konečné dodání zákazníkovi.

Volba nástroje je však závislá na strojovém vybavení (strojovém parku) jednotlivých firem. Nástroje jsou vyráběny z různých materiálů a různá je i jejich konstrukce například dvouchodé nebo tříchodé odvalovací frézy. Tyto nástroje pak mohou způsobit kmity a nepřiměřenou hlučnost celého stroje.



Obr. 4.25 Tříchodá odvalovací fréza (pohled zhora) (24)

V tabulce 4.1 jsou uvedené směrné hodnoty pro řeznou rychlost při frézování odvalovacím způsobem, kde nástrojem je odvalovací fréza KHSS (kobaltem legovaná vysoce výkonná rychlořezná ocel). Hodnoty jsou uvedené pro různé moduly a různé typy materiálů obráběného kola při hrubování a dokončování. (13)

Tab. 4.1 Řezné rychlosti při odvalovacím frézování, katalogové hodnoty firmy fette (13):

	OBROBITELNOST					
	Dobrá		Střední		Špatná	
	Pevnost v tahu		Pevnost v tahu		Pevnost v tahu	
	do 700 N/mm		do 900 N/mm		do 1.200 N/mm	
	m/min		m/min		m/min	
Použita fréza s TiN povlakem						
Modul	Hrubování	Dokončování	Hrubování	Dokončování	Hrubování	Dokončování
< 2	100	130	75	98	55	77
2	92	120	69	90	50	70
3	84	110	63	82	40	56
4	76	99	57	74	30	42
5	68	88	51	66	26	36
6	60	84	45	63	25	35
7	56	78	42	59	24	34
8	52	73	39	55	23	32
9	48	67	36	50	22	31
10	44	62	33	46	21	29
12	38	53	29	41	20	28
14	35	49	26	36	19	27
16	33	46	25	35	18	26
18	30	42	23	32	17	24
Použita fréza bez povlaku						
< 2	75	90	56	67	34	41
2	69	83	52	62	31	37
3	63	75	47	56	29	35
4	57	68	43	52	26	31
5	51	61	38	46	23	28
6	45	56	34	41	22	26
7	42	55	32	38	21	25
8	40	52	30	36	20	24
9	38	49	29	35	19	25
10	37	48	28	34	18	23
12	34	44	26	32	17	22
14	32	42	24	29	16	21
16	30	39	23	28	15	20
18	27	35	20	24	14	18
20	25	31	19	25	13	17
22	23	29	18	23	13	17
25	22	28	17	22	12	16

5. POROVNÁNÍ S VYHODNOCENÍM

5.1 Porovnání vhodnosti použití jednotlivých metod obrábění

Odvalovací frézování

Jedná se o nejrozšířenější způsob výroby čelních ozubených kol. Tento způsob je zcela univerzální, umožňuje výrobu před dalším zpracováním ozubeného kola, ale také finální úpravu tvaru zubu. Tímto způsobem můžeme obrábět i modifikované tvary zubů. (4)

Profilové frézování

Tato technologie je pouze okrajová a používá se u kusové dílenské výroby. Touto technologií dosahujeme pouze malých přesností. U kol velkých rozměrů a velkých modulů se používají stopkové modulové frézky. Výhodou je, že se tímto způsobem dají frézovat i ozubená kola se spojitým šípovým ozubením. (4)

Odvalovací obrázení

Tato technologie je nezastupitelná při výrobě vnitřního ozubení (za použití kotoučového nože při velkosériové a hromadné výrobě). Při výrobě vnějšího ozubení velkých rozměrů a modulů ozubeného kola (za použití hřebenového nástroje při malosériové a kusové výrobě). (4)

Obrázení se s výhodou využívá také v případech, kdy na náboji nebo na hřídeli leží ozubené věnce příliš blízko sebe. (4)

Obrázením také dosahujeme lepších drsností povrchu boku zubů než u frézování. Při použití hřebenového nástroje dosahujeme i lepší přesnosti. (4)

Protahování

Této technologii se využívá hlavně při hromadné a velkosériové výrobě ozubených kol. Pro různé průměry, moduly nebo tvary zubů potřebujeme zvláštní nástroj a ten je velice nákladný. Přesnost ozubení u této technologie je především dána přesností výroby protahovacího nástroje. Tato technologie je vhodná především pro obrábění vnitřního ozubení a drážkování. (2)

Tab 5.1 Vyhodnocení (druh výroby, náklady/třída přesnosti, aritmetická drsnost) u frézování a obrážení (4):

Finální způsob výroby	třída přesnosti ČSN – ISO, DIN										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Frézování											
Obrážení											
modrá – přesná výroba, vyšší náklady; zelená – standardní výroba, běžné náklady											
Způsob výroby	Ra střední aritmetická drsnost [μm]										
	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	1,6	3,2	3,2	6,3	12,5	
Frézování											
Obrážení											
modrá – přesné standardní opracování, menší moduly zelená – běžné opracování až hrubování, větší moduly											

5.2 Porovnání vhodnosti použití dokončovacích metod obrábění

Ševingování

Jedná se o dokončovací způsob tvaru zubu po frézování nebo obrážení. Materiál se ubírá v malých třískách. To je způsobeno díky radiálním řezným drážkám na nástroji a díky skluzu mezi obrobkem a nástrojem.

Obecně lze od této technologie očekávat zlepšení přesnosti zhruba o jeden stupeň dle ČSN-ISO nebo DIN. Přesnost a jakost ozubených kol po ševingování závisí na jakosti všech předcházejících operací. (4)

Broušení odvalovacím způsobem

- kontinuální odvalovací broušení

Jedná se o nejproduktivnější výrobní způsob, který se používá v hromadné a sériové výrobě. Touto technologií můžeme také vytvářet profilovou modifikaci tvaru boční křivky. Běžné přesnosti dosahované touto metodou jsou IT 6-7 dle ČSN-ISO. (4)

- diskontinuální odvalovací broušení

U této technologie je nejznámějším představitelem systém broušení *Maag*. Tento systém se používá pro vysoce jakostní malosériovou nebo kusovou výrobu. Touto metodou lze obrábět ozubená kola až do modulů 30 mm s průměry kol až do 5 m. Podobným způsobem pracují i systémy *Niles*. (4)

Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči

Vývojem CNC brusných strojů s přesným dělením a programovým ovládáním všech pohybů je dán i rozvoj tohoto typu broušení. Tímto způsobem se dají brousit vnitřní i vnější ozubení jak s přímými tak i se šikmými zuby. Výhodou této metody broušení je, že se na upínací trn dá upnout několik kol najednou. Tím zvýšíme několikanásobně výkonnost těchto strojů. (4)

Finální způsob výroby	třída přesnosti ČSN – ISO, DIN											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ševingování												
broušení												
modrá – přesná výroba, vyšší náklady; zelená – standardní výroba, běžné náklady												
Způsob výroby	Ra střední aritmetická drsnost [μm]											
	0,2	0,4	0,4	0,8	0,8	1,6	1,6	3,2	3,2	6,3	13	
ševingování												
broušení												
modrá – přesné standardní opracování, menší moduly zelená – běžné opracování až hrubování, větší moduly												

ZÁVĚR

V této práci s názvem Analýza moderních technologií výroby čelního ozubení jsou postupně v jednotlivých kapitolách popsány druhy ozubení a jejich použití. Dále konstrukční prvky čelních ozubení, technologie a metody výroby čelních ozubení, stroje, nástroje a řezné podmínky používané u jednotlivých metod. V poslední kapitole jsou vyhodnoceny jednotlivé technologie obrábění a popsány vhodnosti jejich použití. U jednotlivých metod obrábění došlo k hlavnímu pokroku díky neustále se rozvíjejícímu strojovému vybavení a rozvíjejících se technologií při vývoji nových nástrojů a jejich materiálů. Tyto aspekty úzce souvisí s výrobou čelního ozubení a jednotlivé metody jsou přímo závislé na strojích na kterých je ozubené kolo obráběno. S rozvojem CNC obráběcích center stoupla produktivita při výrobě ozubených kol a postupně klesá i čas výroby.

Technologie obrábění, které jsou v této práci jednotlivě popsány, jsou metody používané v dnešní době při výrobě ozubených kol. Tyto metody jsou ověřené praktickými zkušenostmi různých firem zabývajících se výrobou ozubení a po dobu jejich používání stále upravovány a zdokonalovány tak, aby byly co nejproduktivnější. Konstrukce a výroba ozubeného kola je velmi složitý proces, který vyžaduje velké množství teoretických znalostí a praktických zkušeností.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HOSNEDL, Stanislav, KRÁTKÝ, Jaroslav. *Příručka strojního inženýra: Obecné strojní části 2, převodové mechanismy*. Praha: Computer Press, 2000. 198 s. ISBN 80-7226-202-5.
2. KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
3. KŘÍŽ, Rudolf. *Strojnické tabulky II: Pohony*. Ostrava: Montanex, 1997. 213 s. ISBN 80-85780-51-8.
4. MORAVEC, Vladimír. *KONSTRUKCE STROJŮ A ZAŘÍZENÍ II: čelní ozubená kola*. Ostrava: MONTANEX, 2001. 291 s. ISBN 80-7225-051-5.
5. PFAUTER, Hermann. *CNC-Wälzfräsen: Verfahren, Maschine, Steuerung, Dialogprogramm*. Ludwigsburg. 2. Auflage. Landsberg/Lech: Verlag moderne industrie AG & Co, 1992. 70 s. ISBN 3-478-93019-7.
6. PFAUTER, Hermann. *Pfauter-Wälzfräsen: Verfahren, Maschinen, Werkzeuge, Anwendungstechnik, Wechselrärer*. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag New York, Heidelberg Berlin, 1976. 605 s. ISBN 0-387-07446-5.
7. ZEMČÍK, Oskar. *Technologická příprava výroby*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
8. Caidel. *Odvalovací/profilové brusky*. [online]. 2007, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.koudelka-zastoupeni.cz/vyr_prg_lie_02.htm>.
9. Caidel. *Protahovací stroje a nástroje*. [online]. 2007, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.koudelka-zastoupeni.cz/vyr_prg_lie_02.htm>.
10. Caidel. *Ševingovací stroje*. [online]. 2007, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.koudelka-zastoupeni.cz/vyr_prg_lie_02.htm>.
11. *Čelní soukolí*. [online]. 2007, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.bondy.cz/galerie/celni-ozubeni/>>.
12. Güdel AG, Switzerland. *Technika přenosu*. [online]. 2008, [cit. 2008-04-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.gudel.com/cz/komponenty/>>.
13. Fette GmbH. *Frézy na výrobu ozubení*. [online]. 2008, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.fette.de/rd_fpn/250_DEU_Run.html>.
14. *Karbidy a nitridy*. [online]. [2007]. [cit. 2008-04-30]. Dostupné na World Wide Web: <www.fp.vslib.cz/kch/texty/Fakulta_strojni/FSCH2/Ch9>.

15. Machineseecker. *Frézovací stroje*. [online]. Machineseecker, 1999-2008, [cit.2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.machineseecker.com/A428813.html>>.
16. Mpresent. *Ozubárenské stroje*. [online]. Tos, 2007, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.tosas.cz/index.php?id_document=10124#>.
17. *Převody ozubenými koly, přednáška 1*. [online]. Ústav konstruování FSI VUT Brno, 2007, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: < <http://www.uk.fme.vutbr.cz> >.
18. Quality Transmission Components. *Spiral Bevel Gears*. [online]. 2007, [cit. 2008-04-30]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.qtcgears.com/e-store/Images/SpiralMiter.jpg>>.
19. Sunlit Technology . *Frézky na výrobu ozubení*. [online]. Eguip Matching, 2008, [cit. 2008-04-26]. Text v angličtině. Dostupné na World Wide Web: <http://www.equipmatching.com/used_equipment/6/92/79818.php>.
20. Shanthi Gears. *Infrastructure*. [online]. Shanthi Gears, 2000-2001, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.shanthigears.com/infrastructure.htm>>.
21. *Výroba ozubených kol, přednáška 3*. [online]. Ústav konstruování FSI VUT Brno, 2007, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: < <http://www.uk.fme.vutbr.cz> >.
22. *Výroba závitů a ozubení*. [online]. 2008, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: <http://strojarsky2.tym.cz/techno/prednaska_cep_13.pdf>.
23. *Základy teorie čelního ozubení, přednáška 2*. [online]. Ústav konstruování FSI VUT Brno, 2007, [cit. 2008-04-26]. Dostupné na World Wide Web: < <http://www.uk.fme.vutbr.cz> >.
24. *Exkurze*. [27.3.2008]. IG-Watteeuw. Brno.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka/Význam	Popis
CNC	(COMPUTER NUMERIC CONTROL)	počítačově číslicové řízení
ČSN	označení normy	česká státní norma
DIN	(DEUTSCHER INDUSTRIE NORMEN)	německá státní norma
HRC	jednotka tvrdosti materiálu	tvrdost materiálu podle Rockwella
ISO	(INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION)	mezinárodní organizace pro normalizaci
IT	označení stupně přesnosti	tolerance jmenovitého rozměru pro daný toleranční stupeň
KHSS	označení oceli	kobaltem legovaná rychlořezná ocel
M'	[mm]	jmenovitý rozměr přes válečky
N	[-]	označení typu soukolí
P	[-]	valivý bod
R_a	[μm]	drsnost materiálu
R_s	[mm]	poloměr kružnice od středu kola ke středu válečku
V	[-]	označení typu soukolí
W	[mm]	rozměr přes zuby
W_1	[mm]	jednotkový rozměr přes zuby
b	[mm]	šířka ozubení
c_a	[μm]	výšková modifikace
c_b	[μm]	podélná modifikace
d_b	[mm]	průměr základní kružnice
d_v	[mm]	průměr válečku nebo kuličky
$\bar{h}_c$	[mm]	konstantní výška zubu
m	[-]	modul
n_f	[min^{-1}]	otáčky odvalovací frézy
n_k	[min^{-1}]	otáčky obráběného kola
s	[mm]	tloušťka zubu
$\bar{s}_c$	[mm]	tloušťka zubu na konstantní třetivě
x	[mm]	jednotkové posunutí
z	[-]	počet zubů měřeného kola
z'	[-]	počet zubů přes které se měří
z_f	[-]	počet chodů odvalovací frézy
z_k	[-]	počet zubů obráběného kola
$z_{\min}$	[-]	minimální počet zubů

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
α	[°]	úhel záběru $\alpha = 20^\circ$
α_d	[°]	úhel tlaku na kružnici o poloměru R_s
α_n	[°]	normální úhel profilu
α_t	[°]	čelní úhel profilu
β	[°]	úhel sklonu zubů
β_b	[°]	úhel sklonu zubů na základním válci
β_k	[°]	úhel sklonu zubů obráběného kola
η_f	[°]	úhel nastavení odvalovací frézy
π	$\pi = 3,14159$	Ludolfovo číslo
ω_f	[°]	úhel sklonu šroubovice frézy