



**FAKULTA
ŠTROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Dokončování ozubených kol

Finishing of gears

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

Daniel PISKAČ

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD ŠTROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. František Holešovský

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Dokončování ozubených kol“ vypracoval samostatně s použitím zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury a pod vedením svého vedoucího bakalářské práce.

V Praze dne

Podpis

Poděkování:

Na úvod mé bakalářské práce bych rád poděkoval prof. Dr. Ing. Františku Holešovskému, za jeho ochotu, cenné rady, poskytnuté konzultace a čas při zpracování této práce.

Abstrakt:

Hlavním tématem této práce je dokončování ozubených kol. Práce je rozdělena na několik částí. První část je věnována výrobě ozubených kol a jednotlivým operacím. V druhé části se tato práce věnuje dokončování ozubených kol a podrobnému popisu konkrétních metod. Třetí část se zabývá řeznými kapalinami pro výrobu a dokončování ozubených kol. Na konci této práce jsou vytvořeny tabulky na drsnost, přesnost povrchů a konkrétní použité materiály.

Abstract:

The main topic of this thesis is finishing of gears. The work is divided into several sections. The first part is dedicated to production of gears and component operations. In the second part, this thesis deals with finishing of gears and detailed description of specific methods. The third part deals with cutting fluids for the production and the finishing. At the end of this work, there are the tables including roughness, surface accuracy and specific materials used.

Klíčová slova: výroba ozubených kol, dokončování ozubených kol, řezné kapaliny, drsnosti

Keywords: production of gears, finishing of gears, cutting fluids, roughness

Použité zkratky a symboly:

Značení	Legenda	Jednotka
l	Minimální délka zdvihu	m
m	Modul ozubení	mm
z	Počet zubů	-
CBN	Kubický nitrid boru	-
D	Průměr nástroje na hlavách zubů	m
F_c	Šířka nástroje	m
F_g	Šířka obrobku	m
L_1	Délka vratného pracovní záběru	m
L_c	Délka zubů ševingovacího kola	m
L_g	Délka zubů obráběného ozubeného kola	m
$N_č$	Počet zubů čelního ozubeného kola	-
N_h	Počet zubů honovacího kola	-
PECH	Pulsní elektrochemické honování	-
R_a	Drsnost	μm
RCF	Rolling contact fatigue	-
ε	Diagonální úhel	$^\circ$
η	Úhel nastavení	$^\circ$
$\varphi_č$	Rotační pohyb obrobku	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$
φ_h	Rotační pohyb honovacího kola	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$
Ψ_c	Rozteč šroubovice ševingovacího kola	$^\circ$
Ψ_g	Úhel sklonu šroubovice pracovního ozubeného kola	$^\circ$

ω	Stoupání šroubovice	°
$\omega_{\check{c}}$	Úhlová rychlost čelního ozubeného kola	[rad·s ⁻¹]
ω_h	Úhlová rychlost honovacího kola	[rad·s ⁻¹]
β_o, β	Sklon zubů	°
Σ	Úhel zkřížení os	°



Obsah

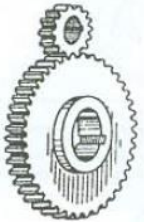










1. ÚVOD	10
2. Výroba ozubených kol.....	11
2.1. Frézování kotoučovou a stopkovou frézou dělicím způsobem	11
2.2. Frézování odvalovací frézou	14
2.2.1. Odvalování přímého ozubení	16
2.2.2. Odvalování šikmého ozubení	16
2.3. Obrázení	17
2.3.1. Obrázení hřebenovým nožem (Maag)	17
2.3.2. Obrázení kotoučovým nožem (Fellows)	18
2.4. Protahování	20
2.5. Tváření ozubení	20
3. Dokončování ozubených kol.....	21
3.1. Ševingování	21
3.1.1. Příčné ševingování.....	22
3.1.2. Diagonální ševingování	23
3.1.3. Tangenciální ševingování	25
3.1.4. Zapichovací ševingování	27
3.1.5. Ševingování vnitřních ozubených kol.....	27
3.1.6. Dosahovaná kvalita povrchu	28
3.2. Honování	29
3.2.1. Honování čelních ozubených kol převodovek s úpravou profilu zubů	30
3.2.2. Pulsní elektrochemické honování kuželových kol (PECH)	32
3.2.3. Výkonné honování ozubení převodovek - drsnost.....	34
3.2.4. Modifikované honování vnějšího ozubení	34
3.3. Broušení	35
3.3.1. Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči	35
3.3.2. Broušení dělicím způsobem s odvalem brousícího kotouče	36
3.3.3. Broušení odvalem brousícího kotouče šnekového tvaru	37
3.3.4. Broušení nástroji z polykrystalického kubického nitridu bóru (CBN)	38
3.3.5. Broušení superabrazivními kotouči	39
3.3.6. Broušení válcových ozubených kol	39
3.3.7. Modifikované broušení čelního ozubení diskovým kolem	39
3.4. Lapování	40
3.4.1. Ultrazvukové asistované lapování	41
3.5. Zvýšení životnosti ozubených kol závodních automobilů kryogenickou úpravou ...	41
3.6. Valivá kontaktní únava ozubených kol v závodních převodovkách	41
4. Řezné kapaliny	43
4.1. Vodní roztoky	43
4.2. Emulzní kapaliny	43
4.3. Zušlechťené řezné oleje.....	43
4.4. Syntetické kapaliny	44
5. Závěr.....	45



6. Seznam použité literatury	47
7. Seznam obrázků	50
8. Seznam tabulek	50

1. ÚVOD

Ozubená kola slouží ve strojírenství jako neprokluzující mechanický přenos otáčivého a přímočarého pohybu z jedné hřídele na druhou. Používají se pro převody se stálým poměrem a s malou osovou vzdáleností. Čelní ozubená kola mají nízkou hmotnost, hlučnost a velký převodový poměr. Požadavky na kvalitu ozubených kol a jejich únosnosti a hlučnosti jsou vyšší a vyšší, proto je potřeba po výrobě ozubeného kola dokončovacích operací, které zlepší vlastnosti ozubených kol. [1] [8]

	soukolí válcová se zuby			soukolí s vnitřním ozubením
	přímými	šikmými	šípovými	
osy rovnoběžné				
	geometricky nejjednodušší, nejméně pevné, nejhlučnější	pevnější, tišší chod, vyzovují axiální síly na ložiska	pevné, tiché, ruší axiální síly, dražší	soukolí s ozubeným hřebenem 
osy různoběžné	soukolí kuželová se zuby			zakřivenými
	přímými	šikmými		
			menší citlivost na výrobní nepřesnosti, klidnější, tišší chod, vyšší pevnost a trvanlivost ozubení, nákladná výroba - jednoúčelové stroje	
	nejběžnější pro méně náročné převody, neklidný chod, hlučnost, levnější výroba			
osy mimoběžné	soukolí šroubová válcová	soukolí šneková	soukolí šroubová kuželová (hypoidní)	
				

Obrázek 1. Typy ozubených kol [2]



2. Výroba ozubených kol

Výroba ozubených kol je složitý technologický proces. Avšak ozubená kola jsou nezbytnou součástí, jelikož ve většině převodových mechanismů se používají ozubená kola.

Ozubená kola se dají vyrábět několika způsoby. Prvním způsobem je netřísková výroba, mezi kterou se řadí například kování nebo odlévání. Druhou možností je třísková metoda, která je nejčastější. Mezi třískové obrábění patří frézování, obrázení a protahování. Můžeme obrábět čelní kola a hřebeny se šikmými nebo přímými zuby, šneková kola a šneky, kuželová kola se šikmými, přímými nebo zakřivenými zuby. Dosahovanou přesnost a následné dokončování ovlivňuje několik faktorů. Hlavními faktory jsou stroj, nástroj, rezné podmínky, použitá rezná kapalina a upnutí nástroje. [3]
[4]

Rozdělení výroby třískové metody

- Frézování
 - o Kotoučovou frézou dělicím způsobem
 - o Stopkovou frézou dělicím způsobem
 - o Odvalovací frézou
- Obrázení
- Protahováním

2.1. Frézování kotoučovou a stopkovou frézou dělicím způsobem

Při frézování ozubených kol se používá kotoučová nebo stopková (čepová) fréza, obě frézy jsou tvarové neboli modulové. Nazývají se tak, protože na konkrétní ozubené kolo je potřeba konkrétní tvarová fréza. To znamená, že na určité ozubené kolo o daném modulu a počtu zubů, potřebujeme frézu, která svým tvarem přesně odpovídá zubové

mezeře. Avšak většinou se používá pro určité rozpětí zubů jen jeden nástroj. Pro konkrétní počty zubů existuje sada fréz, která je pro každý modul. Tyto sady obsahují 8, 15 nebo 26 fréz pro jeden modul podle požadované přesnosti. Tyto sady jsou rozděleny v následující tabulce. Používají se takto z důvodu hospodárnosti. [3] [5]

Tabulka 1. Rozdělení fréz podle počtu zubů [5]

z	Počet členů v sadě			z	Počet členů v sadě		
	26	15	8		26	15	8
	Číslo frézy				Číslo frézy		
12	1	1	1	26 a 27	5	5	5
13	1 1/2	1 1/2		28 a 29	5 1/4		
14	2	2	2	30 a 31	5 1/2	5 1/2	5
15	2 1/2	2 1/2		32 až 34	5 3/4		
16	2 3/4		3	3	35 až 37	6	6
17	3	38 až 41			6 1/4		
18	3 1/4	3 1/2	3	42 až 46	6 1/2	6 1/2	6
19	3 1/2			47 až 54	6 3/4		
20	3 3/4	4	4	55 až 65	7	7	7
21	4			66 až 80	7 1/4		
22	4 1/4	4 1/2	4	81 až 102	7 1/2	7 1/2	7
23	4 1/2			103 až 134	7 3/4		
24 a 25	4 3/4			135 až ∞	8	8	8

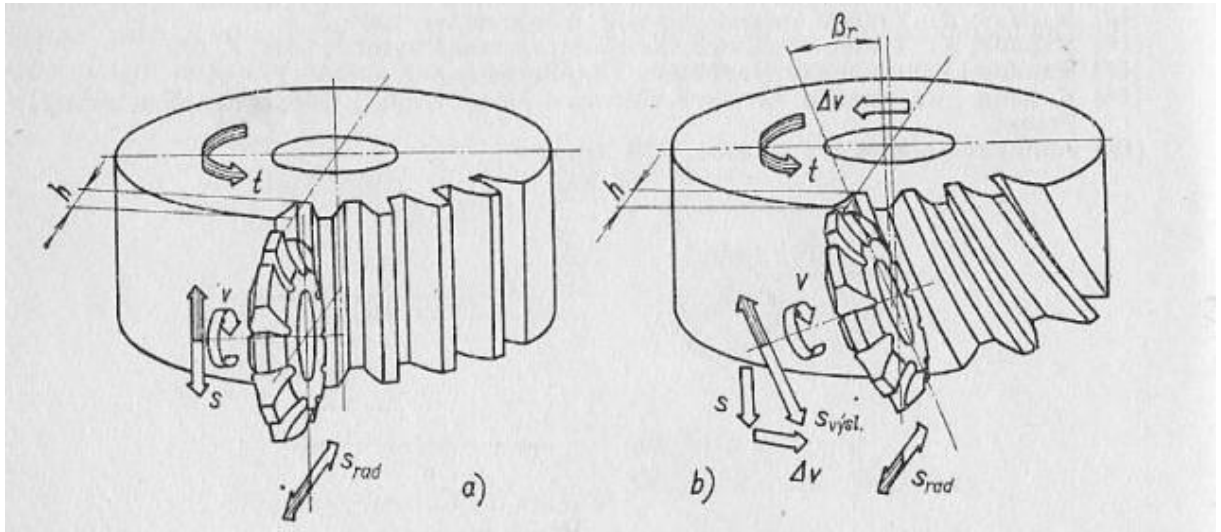
Ozubení obrábíme na univerzálních konzolových frézkách, které mají dělicí přístroj. Dále obrábíme na speciálních frézkách pro tvarové frézování.

Při frézování jak čepovou, tak i kotoučovou frézou volíme řeznou rychlost 10 až 20 m.min⁻¹, podélný posuv volíme 70 až 180 mm.min⁻¹.

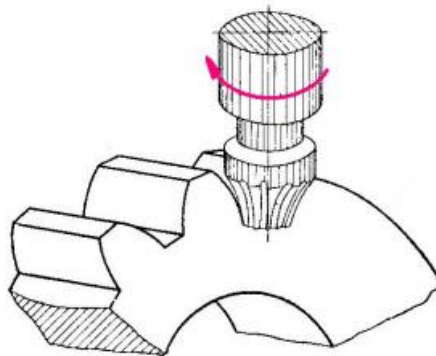
Při frézování kotoučovou frézou o daném modulu koná fréza hlavní řezný pohyb, stůl s obrobkem vykonává pohyb proti otáčení frézy. Potřebný dělicí pohyb zajišťuje dělicí přístroj, kde je upnut obrobek. Při začátku obrábění je fréza na patní kružnici obráběného kola.

Frézování zubu závisí na modulu. U malých modulů frézujeme mezeru mezi zuby na jeden záběr a u větších modulů frézujeme většinou na dva záběry. Jeden je hrubovací a druhý je na čisto. Obrobek vždy otočíme o jeden zub a frézujeme další mezeru, dokud není vyfrézované celé kolo. Při frézování přímého ozubení musí osa kotoučové frézy být

rovnoběžná s osou obrobku. V případě šikmého ozubení musí být kotoučová fréza mimoběžná s osou obrobku o úhel stoupání. [3] [5]



Obrázek 2. Frézování ozubení kotoučovou frézou dělicím způsobem [5]



Obrázek 3. Frézování stopkovou frézou dělicím způsobem [6]

Dělicí metoda není úplně přesná, jelikož vznikají nepřesnosti díky dělicímu přístroji, kdy mohou vzniknout chyby na dělicím kruhu, dále chyba obsluhy nebo další. Takto vyrobená ozubená kola se po sobě nepřesně odvalují. Přesnost se nachází v rozmezí IT9 až IT10, $R_a = 1,6$ až $3,2 \mu\text{m}$. [3] [5]

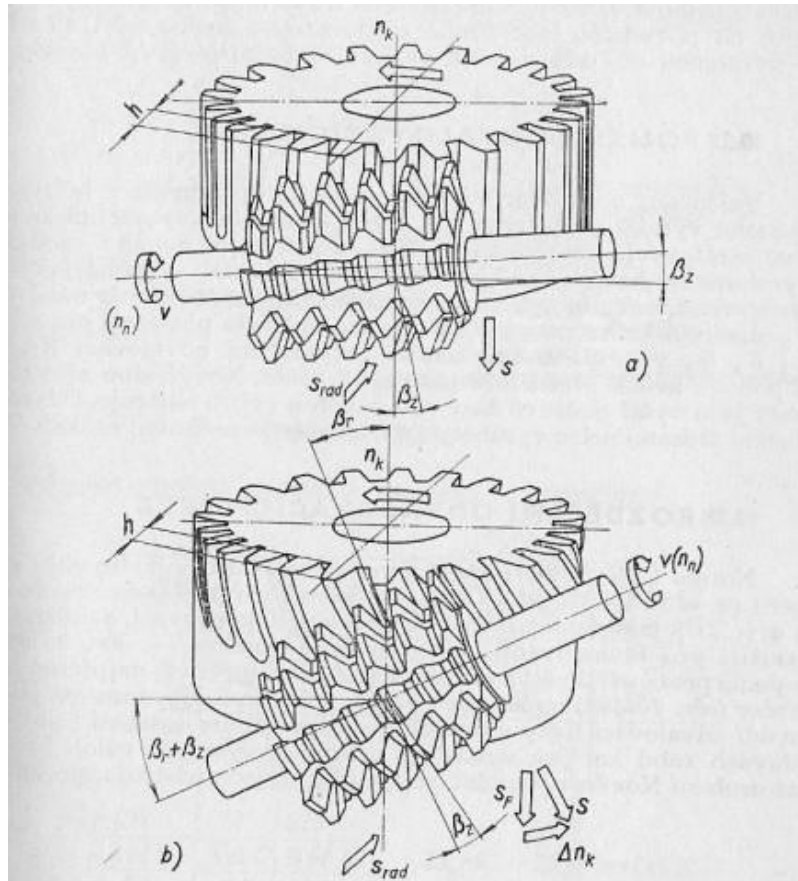
Možnosti dělení

- Přímé: dělicí kotouč nalícovaný na vřetení, typicky 24 dílů nebo dělicí deska se západkou a dílky po obvodu
- Nepřímé jednoduché (převodové): dělení probíhá na jednom dělicím kruhu dělicích dírek a využívá šroubového převodu děličky (šnek a šnekové kolo)
- Nepřímé složené (převodové nepřímé): dělení pracuje na dvou kruzích dělicích dírek
- Diferenciální dělení: používá se v případě, že nestačí počet dírek na dělicím kotouči (typicky prvočísla) a tato diference (rozdíl) se opraví natáčením anebo odtáčením dělicí desky vůči otáčení dělicí kliky. Diferenciální dělení je docela zajímavé téma na samostatný článek.“ [5]

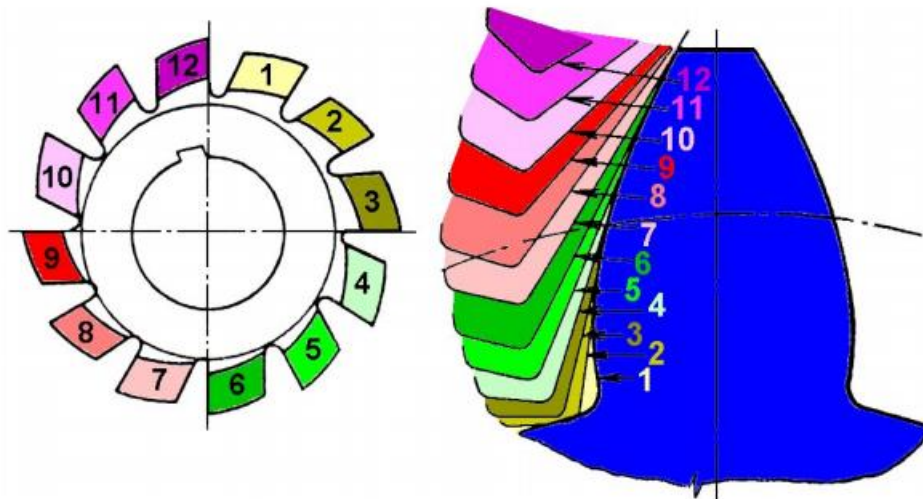
2.2. Frézování odvalovací frézou

Při frézování odvalovacím způsobem se fréza otáčí kolem své osy, vykonává řezný pohyb a obrobek se otáčí kolem své osy (Obr. 4). Zuby frézy jsou podsoustruženy a fréza má tvar šroubu. Odvalovací frézy jsou v několika provedeních a dělí se na jednochodé a vícechodé. Odvalovacím způsobem se dá vyrábět pouze evolventní ozubení. Výroba ozubení je plynulá, to znamená, že je rychlejší než frézování. Avšak největší výhodou výroby ozubených kol odvalováním je, že jedním nástrojem konkrétního modulu může vyrobit ozubená kola s libovolným počtem zubů. Zároveň tím můžeme vyrobit jak přímá, šikmá, korigovaná, nekorigovaná i šneková ozubená kola. Tvoření boků zubů probíhá jako obalové plochy jednotlivých poloh nástroje (Obr. 5).

Při frézování odvalovací frézou je pouze pár zubů v záběru, a tak jsou břity nerovnoměrně zatížené. Moderní frézky jsou vybaveny automatickým krokováním frézy, která po určité době posune frézu o nutnou hodnotu ve směru její osy. Díky tomu je trvanlivost nástroje zvýšena o 50 až 70 %. [3] [4] [7]



Obrázek 4. Frézování odvalem [7]



Obrázek 5. Vytvoření evolventy [4]

2.2.1. Odvalování přímého ozubení

Odvalovací fréza se natáčí ke kolmé rovině k ose kola o úhel nastavení η [°], který se rovná stoupání šroubovice ω [°] dané frézou. Fréza musí konat tolik otáček, aby se rovnaly počtu zubů. Obrobek s frézou a jejich otáčení je na sobě závislé. Aby se fréza mohla odvalovat a vytvářet zubové mezery, musí mít frézoví zuby ve šroubovici. Šroubovice může být levá nebo pravá. Šroubovice je závislost rozteče zubů a průměru frézy.

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{m}{D} \quad [-] \quad (1)$$

β - je sklon zubů [°]

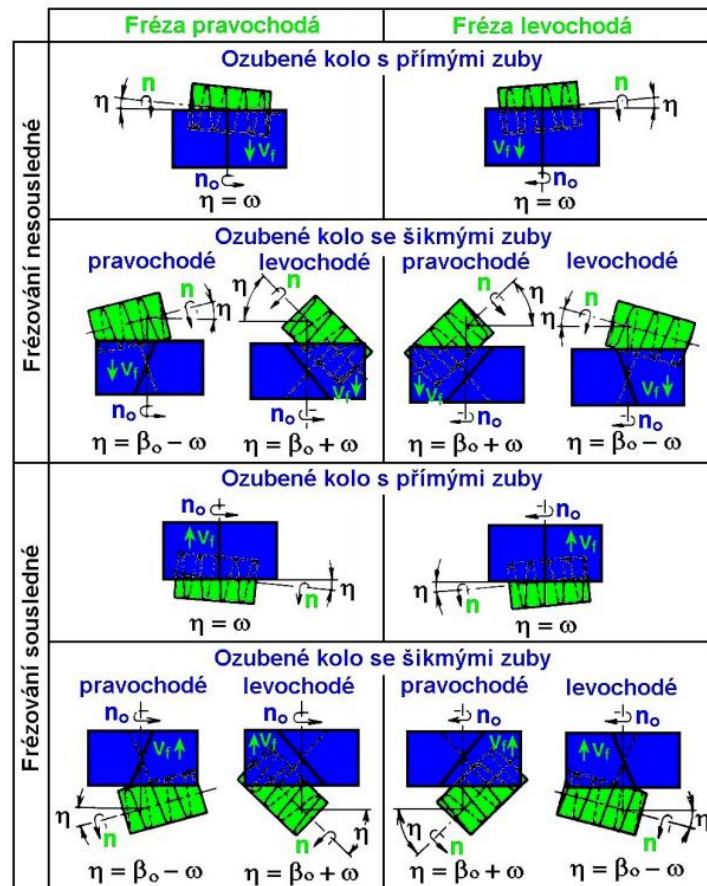
m – modul ozubení [-]

D – průměr nástroje na hlavách zubů [m]

2.2.2. Odvalování šikmého ozubení

Odvalovací fréza se natáčí ke kolmé rovině k ose kola o úhel nastavení $\eta = \beta_0 \pm \omega$ [°], kde β je úhel sklonu zubů obráběného kola a ω je úhel stoupání odvalovací frézy. Fréza musí konat tolik otáček, aby se rovnaly počtu zubů. Obrobek s frézou a jejich otáčení je na sobě závislé. Obrobku je ovšem potřeba dát další pohyb, který je závislý na pravo nebo levotočivosti frézy.

V případě, že frézy a zhotovovaná kola šroubovice mají stejný směr, je nutné vřetenou fréz dát k rovině otáčení vyráběných kol v úhlu $\beta - \alpha$. To znamená, že úhel sklonu fréz a ozubených kol se odečítají. V opačném případě, tedy že nemají stejný směr, je úhel $\beta + \alpha$. Úhly se sčítají. [7] [8]



Obrázek 6. Vyklonění vřeteníku při odvalovacím frézování [4]

2.3. Obrázení

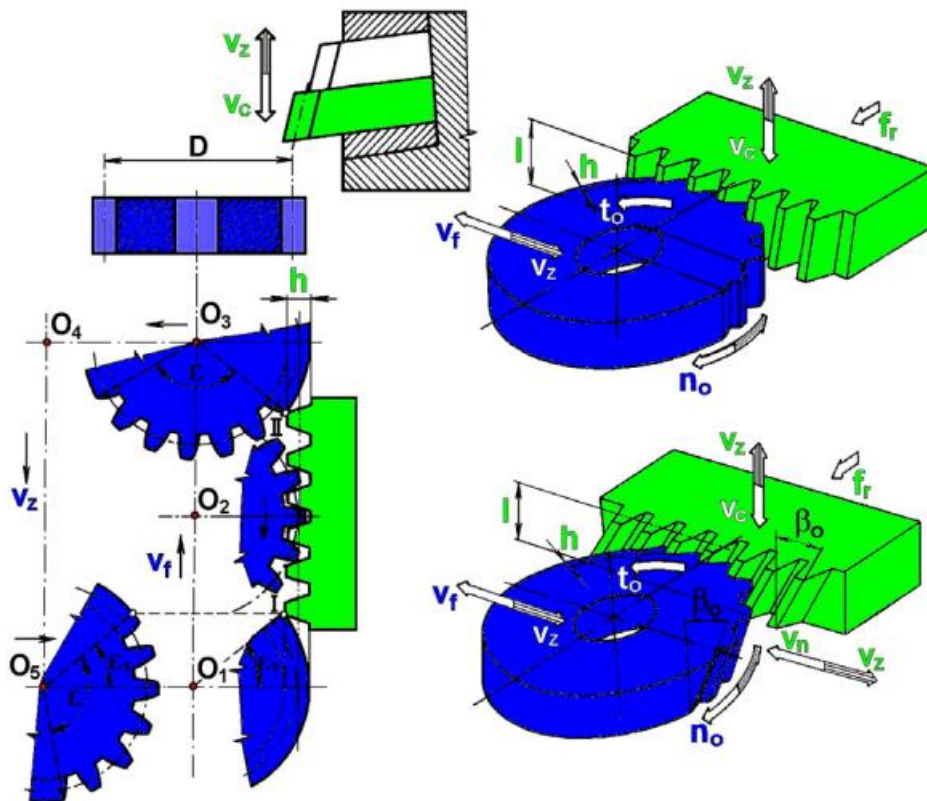
2.3.1. Obrázení hřebenovým nožem (Maag)

Princip této metody je záběr ozubeného hřebene s ozubeným kolem. Čelní kole se valí po ozubeném kole. To znamená, že není potřeba složité geometrie nástroje ani složité kinematiky. Nástroj koná řezný přímočarý vratný pohyb a má méně zubů než vyráběné kolo. Obrobek koná otáčivý pohyb kolem své osy a zároveň pohyb posuvný po délce hřebene. Poté se odsune ze záběru a opět přesune do výchozí polohy, kde se pootočí a postup se opakuje do té doby, než je celé kolo hotové.

Jedním nástrojem lze obrábět kola o libovolném počtu zubů s přímými i šikmými zuby jak pravých, tak levých i pro daný modul nezávisle na zubu a jeho úhlu sklonu. Hřeben může mít i dva nebo dokonce jeden zub. V případě výroby šikmého ozubení a nástroje s ozubením přímým, používá se smykadlo vykloněné o úhel sklonu zubů

obráběného kola. Čím menší je odvalovací posuv, tím přesněji nástroj tvaruje evolventní boky zubů. Řezná rychlost a posuv nejsou na sobě závislé.

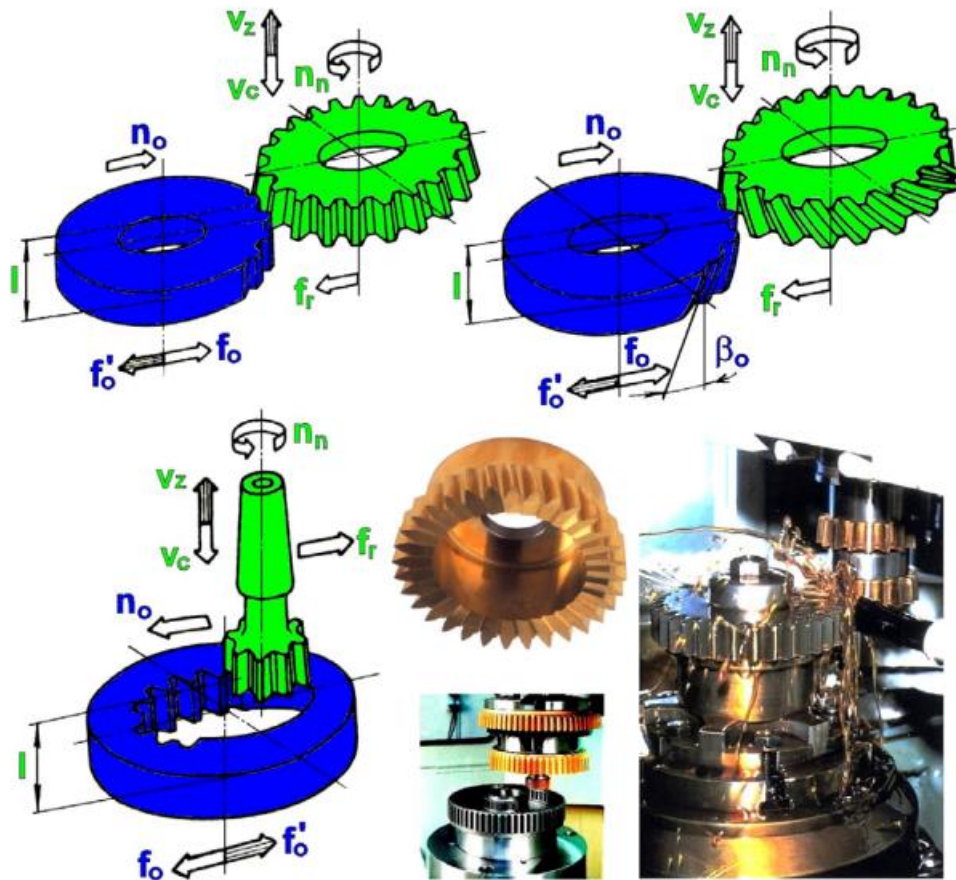
Typické pro tuto metodu je levný nástroj, vysoké náklady na obráběcí stroj a dlouhé výrobní časy. Hřeben se dá jednoduše ostřit. Frézováním můžeme upravit i přímé boky zubů. Hřebenové nože jsou jedny z nejpřesnějších nástrojů na řezání zubů. [4] [8]



Obrázek 7. Kinematika pohybů metodou Maag [4]

2.3.2. Obrázení kotoučovým nožem (Fellows)

Principem je záběr dvou ozubených kol do sebe bez vůle. Při obrábění se nástroj s obrobkem po sobě odvalují. Nástroj, který je upnutý ve smykadle, koná přímočarý vratný pohyb ve směru své osy a rotuje kolem své osy o určitých otáčkách. Obrobek pouze rotuje kolem své osy, ale o jiných otáčkách než nástroj. Tím jsme schopni vytvořit výsledný evolventní profil zubů, které jsou obálkou evolventních boků zubů nástroje (Obr. 8). [4] [8]



Obrázek 8. Kinematika pohybů metodou Fellows [4]

Velikou výhodou této metody je, že lze obrábět i vnitřní ozubení. Jelikož má kotoučový nůž krátký náběh i přeběh, uplatňuje se tato metoda i při výrobě dvoukol. Pro výrobu šikmého ozubení je třeba nástroje s přímými nebo šikmými zuby, který během pracovního dvojdvihu vykonává díky šroubovitým vodítkům, které mají totožnou výšku a směr stoupání jako nástroj, rotační přídatný pohyb ve šroubovici o úhlu stoupání β_o (úhel sklonu zubů obráženého kola).

Je třeba si dát pozor na vhodné zvolení geometrických poměrů mezi nástrojem a obrobkem, nevhodně zvolených řezných podmínek. Důsledkem mohou být velký otěr nástroje, malá kvalita ozubení, poškození obrobku a stroje. [4] [8]

2.4. Protahování

Protahováním lze vyrábět ozubená kola s přímým nebo šikmým ozubením a jak vnější, tak i vnitřní ozubení. Jedná se o efektivní metodu používanou ve velkosériové a hromadné výrobě, jelikož potřebujeme pro každý průměr, modul a tvar zubu přesný trn. Nástrojem je protahovací trn, na kterém jsou upevněny segmenty s břity odstupňovanými ve tvaru zubové mezery. Poslední dva segmenty jsou kalibrovací a zajišťují výsledný tvar a rozměr zubové mezery.

Vnější ozubení se vyrábí dělicím způsobem. Po protažení zubové mezery se kolo pootočí o jednu zubovou rozteč a postup se opakuje. Nástroj má na části obvodu vynechány zuby, aby se nemusel vysouvat ze záběru. Toto je ovšem vhodné pro úzká kola.

Vnitřní ozubení se protahuje na jeden záběr nástrojem, který má válcový tvar a po obvodu má umístěné břity ve tvaru zubových mezer pro dané ozubené kolo. [4] [9]

2.5. Tváření ozubení

Tváření ozubených kol probíhá za studena a to válcováním, kováním a lisováním. Ocelové kalené ploché nebo kruhové čelisti, které mají tvar hřebenů nebo ozubených kol, vytlačují daný profil mezer mezi zuby daného kola. Tento způsob se nazývá příčné válcování. Při podélném válcování se užívají kotouče určitého tvaru, které vytlačují profil mezer mezi zuby při rovnoběžném pohybu s osou kola. Velikou výhodou je vysoké zpevnění materiálu. Tím se zlepšuje životnost ozubeného kola. Používá se pro hromadné série. [3]

3. Dokončování ozubených kol

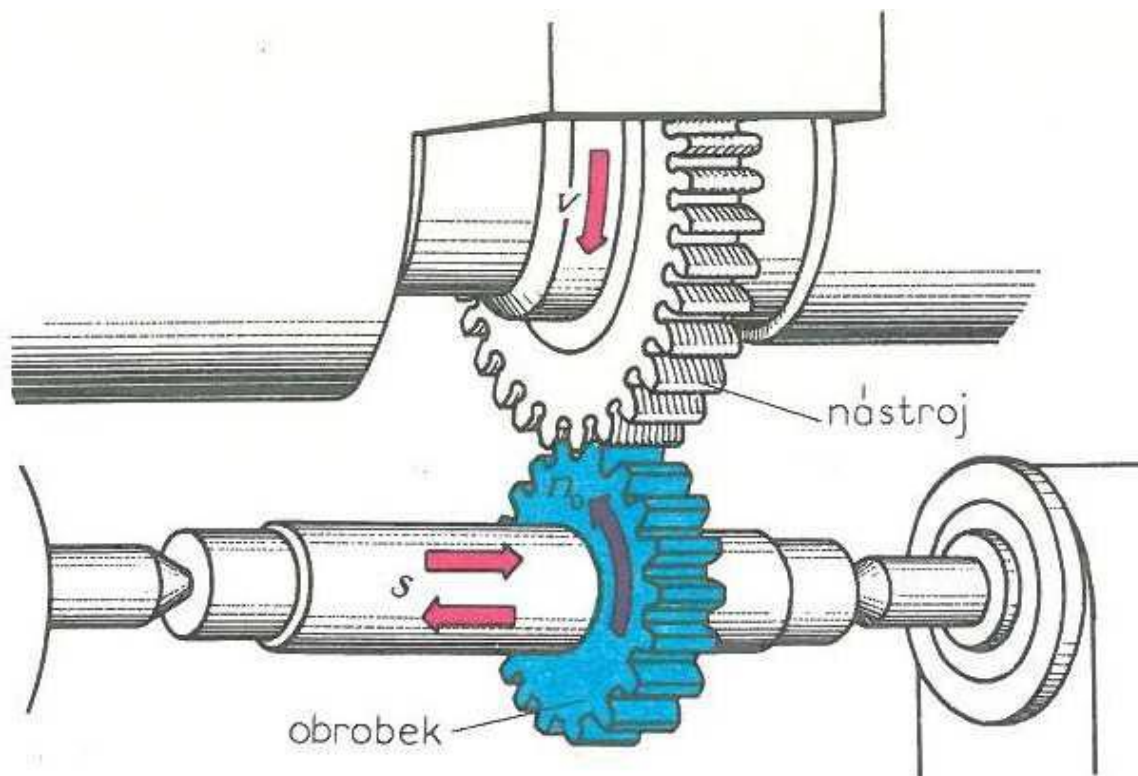
- Ševingování
- Honování
- Broušení
- Lapování

3.1. Ševingování

Tento způsob dokončování se používá pro čelní ozubená kola, převážně pro nekalená nebo po cementaci před kalením. Odebírají se jemné třísky z boků zubů, čím se zvyšuje geometrická přesnost boků zubů, zlepšuje se profil zubů, zvyšuje jakost povrchu a snižují se mezní úchytky v zubových roztečích. Jako nástroj se používá modifikované přesné ozubené kolo se šikmými zuby nebo se používá hřeben či šnekové kolo. Břity nástrojů jsou vytvořeny drážkami na bocích zubů. Ševingovací kolo, které je poháněné, zabírá prostorově s obráběným ozubeným kolem, které je hnané a bržděné. Lze to tedy modelovat jako záběr válcového šroubového soukolí. Platí tedy kinematické závislosti pro šroubový pohyb. U menších kol vykonává obráběné kolo vratný posuvný pohyb, v případě větších kol vykonává tento pohyb kolo ševingovací. V místě záběru kol se přivádí řezná kapalina. [3] [4] [10]



Obrázek 9. Ševingovací kola [4]



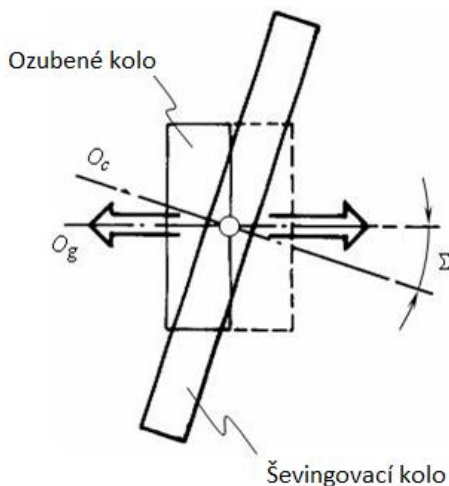
Obrázek 10. Nástroj (ševingovací kolo) a postup při ševingování [10]

Ševingování můžeme rozdělit na několik druhů podle kinematických poměrů. Rozlišujeme ševingování podélné, kde je posuvný pohyb rovnoběžný s osou obráběného kola. Diagonální, kde osa obráběného kola se směrem posuvného pohybu svírá úhel Σ , $0^\circ < \Sigma < 45^\circ$. Diagonálně příčné, kde úhel Σ je $45^\circ < \Sigma < 90^\circ$, příčné $\Sigma = 90^\circ$ a zapichovací, kde koná nástroj radiální posuv. A ševingování tangenciální.

3.1.1. Příčné ševingování

Obráběné kolo a ševingovací kolo se otáčejí kolem své osy O_g a O_c . Úhlové rychlosti obou kol jsou navzájem synchronizovány. Pohyb je znázorněn na Obr. 11. Zdvih kola je o kousek větší než šířka zubu. Tyto zdvihy můžeme několikrát opakovat až do té doby, dokud nedosáhneme požadované kvality povrchu. Teoreticky obráběné kolo nekonečné šířky může být obráběno velmi úzkým ševingovacím kolem. To je hlavní důvod, proč příčné ševingování není vždy nahrazeno ekonomičtějším diagonálním ševingováním.

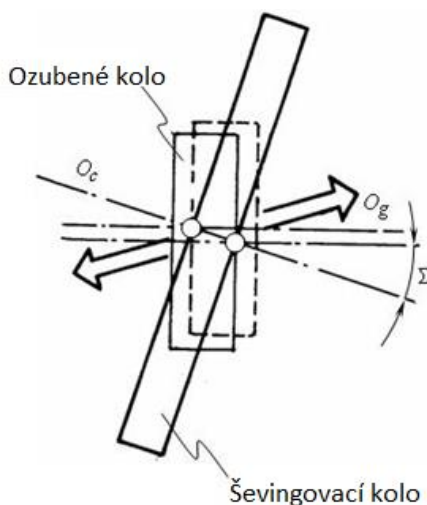
Kinematika příčné metody neumožňuje ideální využití švingovacího kola. Je to kvůli odstraňování třísky uprostřed. Ve skutečnosti je bod kontaktu křížení os obou kol uprostřed nástroje. Zde dochází k největšímu opotřebení. Můžeme tomu předcházet pomocí posunutí nástroje podél osy O_c . Hlavní nevýhodou je delší strojní čas.



Obrázek 11. Příčné švingování [11]

3.1.2. Diagonální švingování

Obě kola se otáčejí v těsné blízkosti kolem svých os O_g a O_c . Obě osy jsou v určité vzdálenosti a kříží se pod úhlem Σ . Úhlové rychlosti jsou časově synchronizované. Jedno z kol je přiváděné pod diagonálním úhlem ϵ . Úhel ϵ je v rozsahu $\epsilon = 5^\circ - 45^\circ$.



Obrázek 12. Diagonální švingování [11]

K dokončení obráběného kola je potřeba několik vztahů. Šířka obrobku F_g , šířka nástroje F_c a diagonální úhel ε jsou na sobě závislé. Minimální zdvih závisí na právě uvedených parametrech.

$$\varepsilon = \tan^{-1} \left(\frac{L_g \sin \Sigma}{L_c - L_g \cos \Sigma} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \Sigma}{\frac{L_c}{L_g} - \cos \Sigma} \right) \quad [^\circ] \quad (2)$$

$$l_1 = L_g \frac{\sin \Sigma}{\sin(\Sigma + \varepsilon)} \quad [\text{m}] \quad (3)$$

$$L_g - \text{délka zubů obráběného ozubeného kola } (L_g = F_g / \cos \psi_g) \quad [\text{m}] \quad (4)$$

ψ_g - úhel sklonu šroubovice pracovního ozubeného kola $[^\circ]$

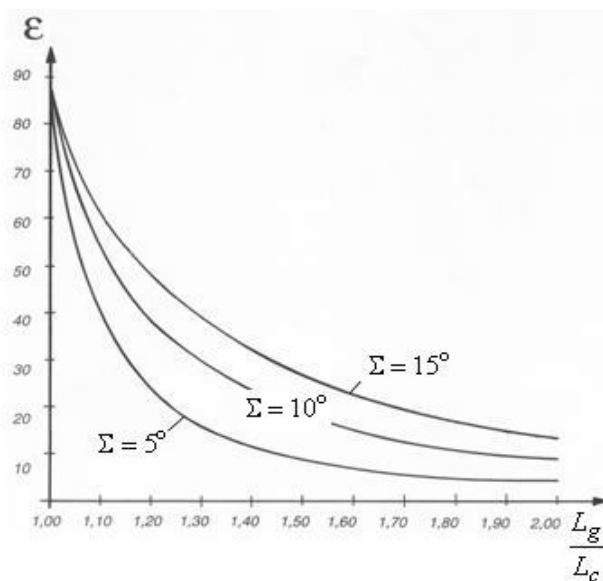
$$L_c - \text{délka zubů švingovacího kola } (L_c = F_c / \cos \psi_c) \quad [\text{m}] \quad (5)$$

ψ_c - rozteč šroubovice švingovacího kola $[^\circ]$

l_1 - délka vratného pracovní záběru $[\text{m}]$

Toto platí, pokud délka zubu švingovacího kola se rovná nebo je menší než obráběného kola. Tedy: $L_c \leq L_g$.

To znamená, že maximální diagonální úhel závisí na délce mezi dvěma zuby a úhlu zkřížení os Σ . Na obrázku jsou znázorněny příklady této závislosti.



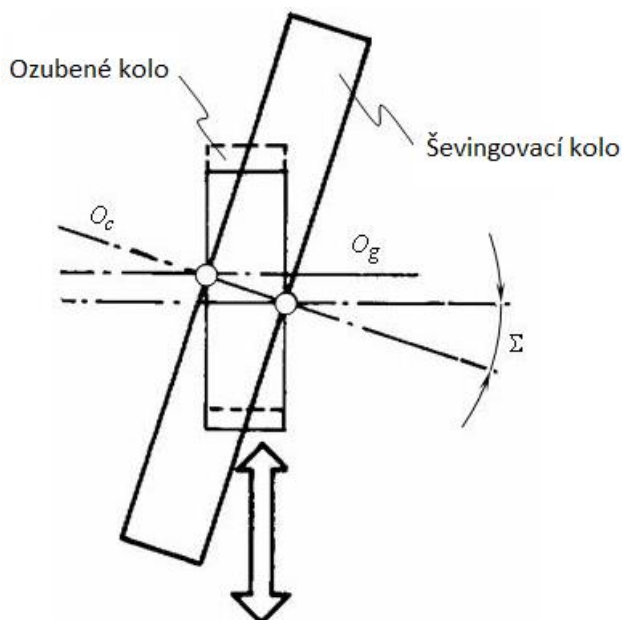
Obrázek 13. Závislost diagonálního úhlu na délce mezi dvěma zuby a úhlu zkřížení os [11]

Výhodou diagonálního ševingování je především krátký zdvih. Čím větší je diagonální úhel ε , tím je větší je výhoda této metody. Kratší zdvih a menší počet opakování má za výsledek snížení potřebného času na dokončování. Pro dokončování malého kola běžně stačí jeden zdvih. Pro kola s moduly $m = 2 \div 3$ mm mohou být dokončeny pouze pár tahy. Pokud ševingovací kolo se pohybuje vratně vpřed, pak strana zubu získává lepší kvalitu povrchu. Při pohybu dozadu získává lepší kvalitu povrchu druhá strana zubu. Proto by se počet zdvihů dopředu měl rovnat počtu zdvihů dozadu.

Náklady jsou přímo úměrné velikosti ševingovacího kola. Čím širší je kolo, tím vyšší jsou náklady. Proto se diagonální způsob používá pro šířku čela max. $F_c \leq 100$ mm.

3.1.3. Tangenciální ševingování

Obráběné a ševingovací kolo se otáčí kolem své osy O_g a O_c . Jsou vůči sobě pootočené o úhel Σ . Obvodové rychlosti jsou vůči sobě synchronizovány. Ševingovací kolo je přiváděno k obráběnému kolu, kolmo k jeho ose.



Obrázek 14. Tangenciální ševingování [11]



Při této metodě se běžně užívá jen jednoho zdvihu na dokončování a délka zdvihu je velmi krátká. Když je obráběné a ševingovací kolo v záběru v dolní poloze, pak ševingování nastane v pravé krajní poloze šířky čela kola. Dále se kontaktní plocha pohybuje podél šířky celého čela až na opačnou stranu obráběného kola.

Tento způsob je nejrychlejší. Opotřebení není takové, jelikož je v záběru celá šířka kola. Opět se používá pro kola s čelní šířkou $F_c \leq 100$ mm. Minimální délku zubu ševingovacího kola lze spočítat pomocí vzorce:

$$L_c = \frac{L_g}{\cos \Sigma} \quad [\text{m}] \quad (6)$$

Minimální délka zdvihu je:

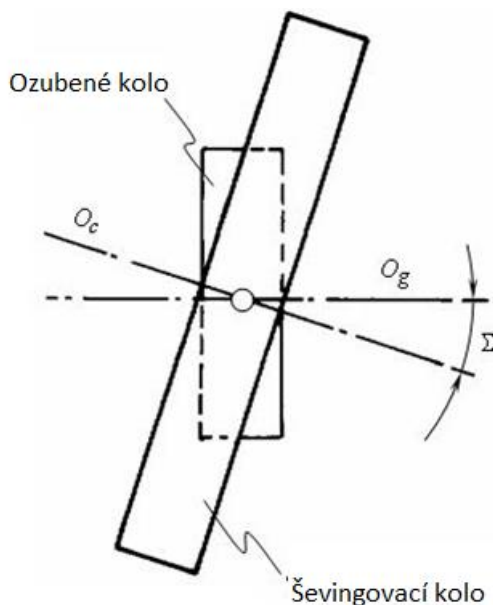
$$l = L_c \sin \Sigma \quad [\text{m}] \quad (7)$$

Tangenciální způsob používáme, když se obráběné kolo nachází blízko osazení, které způsobuje překážku pro příčné nebo diagonální ševingování. Většinou je nutné zmenšit úhel zkřížení os na $\Sigma = 3^\circ$, aby se zabránilo zasahování ševingovacího kola a ramene. Snížení úhlu způsobuje horší řezný výkon nástroje.

Pro tangenciální způsob potřebujeme speciální ševingovací kolo, které musí mít zuby vzájemně vyrovnané, aby se zabránilo stopám po zubech na dokončovací ploše.

3.1.4. Zapichovací ševingování

Obráběné a ševingovací kolo se otáčí kolem své osy O_g a O_c , kde osy jsou opět vůči sobě natočeny o úhel Σ . Ševingovací kolo koná přísluvný pohyb k obráběnému kolu. Ševingovací kolo nekoná podélný pohyb k žádné z os O_g či O_c .



Obrázek 15. Zapichovací ševingování [11]

Zdvih nástroje je velmi krátký a čas operace je velmi krátký. Tento způsob však požaduje vysokou přesnost návrhu ševingovacího kola.

3.1.5. Ševingování vnitřních ozubených kol

V podstatě se jedná o stejný způsob jako u kol vnějších, má však nějaká omezení. Vnější průměr ševingovacího kola je omezen vnitřním průměrem kola obráběného. Vnější průměr nástroje nesmí být větší jak 100 mm. Dalším problémem je omezení zkřížení úhlu Σ . Stává se, že není možné volně projíždět vnitřním obráběným kolem. Pokud je možné úhel nastavit alespoň $\Sigma = 10^\circ$, pak je možné dokončit ozubené kolo v požadované kvalitě. Pokud je úhel zkřížení os menší, výsledkem je zhoršená kvalita.

Tento způsob může být prováděn pro ozubená kola těžkých užitkových vozidel a velkých převodovek (např. turbín a námořních motorů). [11]

3.1.6. Dosahovaná kvalita povrchu

Kvalita obráběného kola závisí na způsobu ševingování. Vysokou důležitost má volba řezné rychlosti, rychlosti posuvu a požadovaný počet průchodů. Ševingovací kolo by nemělo mít žádné vibrace, zakřivení, vůli vřetena ani žádné axiální výkyvy. Obráběné kolo musí být pevně upnuto. Průměr držáku by měl být co nejbližší průměru zubům obráběného kola.

Povrchová úprava obráběného kola může dosahovat až $Ra = 0,4 \div 0,6 \mu\text{m}$.

Tabulka 2. Oblast použití kol s různými přesnostmi [11]

Třída přesnosti (DIN 3962)	Oblast použití	Komentáře
3	Pro kontrolní účely	Kola tohoto druhu jsou broušena
4	Kola pro běžné použití, kontrolu zařízení pro převod, ozubená kola letadel, podléhá vysokému točivému momentu, strojové nástroje	Ozubená kola nejsou podrobena tepelnému zpracování, mohou být ševingována
5	Letecká ozubení, obráběcí stroje, ozubená kola pro převodovky automobilů, autobusů a nákladních automobilů	Přijatelná úroveň kvality může být dosažena ševingováním, avšak dobrá kvalita bývá ztracena tepelným zpracováním
6	Automobilové a průmyslové převodovky, obráběcí stroje	Této kvality může být snadno dosaženo ševingováním nebo po tepelném zpracování vycházející ze třídy DIN 5
7	Standardní přesnost pro automobilové a průmyslové převodovky	Standardní kvalita ševingování. Nevznikají žádné problémy po tepelném zpracování
8	Nízké převodovky automobilů a užitkových vozidel, traktorů, zemědělských a obráběcích strojů	Nejsou žádné potíže se ševingováním. Konstrukční parametry nejsou narušeny po tepelném zpracování
9-10	Zemědělské traktory, pomocné převodovky ve strojních budovách	
11-12	Zemědělské stroje	

3.2. Honování

Honování se používá k obrábění vnitřní a občas vnější válcové plochy. Avšak honování se také používá pro dokončování ozubených kol, která ale musí být kalená. Honování, které je provedeno okamžitě po kalení, je nazýváno jako vysoce výkonné. Využívá stejného principu jako ševingování. Jelikož po tepelném zpracování dochází k malým nepřesnostem, tak se používá právě honování na jejich odstranění. Například zlepšení tvaru zubu, odstranění menších nerovností a snížení drsnosti a hluku ozubených kol v převodovkách. Přídavek na obrábění je pouze 10 – 15 μm . [12] [13]

Tvar nástroje je opět ozubené kolo, které zabírá s kolem obráběným. Je vyrobeno z abrazivního materiálu, kterým odebírá materiál ze zubů pod zkřížením os. Pro honování vnějších ozubených kol má nástroj tvar prstence s vnitřním ozubením. Pro honování vnitřních ozubených kol se používá kolo vnější. Honovací kolo ve tvaru prstence má několik výhod. Jelikož nástroj a obrobek mají malou vzdálenost os a tloušťka zubů je velká, dosahuje se vyšší tvrdosti dokončování. Díky vyšším silám a rychlosti úběru materiálu, dosahujeme lepších zbytkových napětí.

Rychlost řezání je vektorový součet podélného posuvu a výškového posuvu. Řezná rychlost se pohybuje pouze v rozmezí 1 - 10 m/s. Kvůli této nízké řezné rychlosti je potřeba vysokých řezných sil za jednotku času, aby se dosáhlo požadovaného odběru materiálu. Díky nízkým teplotám při honování, nehrozí žádná tepelně ovlivněná oblast či jiné tepelné poškození. Proto je možné použít i diamant jako abrazivní materiál i pro ocel. Nízká řezná rychlost a výsledné teploty vyžadují pouze vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebením brusiva. Toto je nazýváno jako coroning.

Jako materiál se používá CBN nebo diamant, ty ovšem vedou k vysokým hodnotám drsnosti povrchu obráběného ozubeného kola, jelikož nástroj obsahuje hrubá zrna. Z ekonomického hlediska se však spíše používají materiály jako korund, slinovací korund nebo syntetické pryskyřice.

Sférické honování bylo vyvinuto s cílem získat co nejvíce možností úpravy boků zubů. Elektronicky vedený pohyb je používán pro snížení odchylky. Úhel zkřížení os může být upravován během procesu a úprava řezné rychlosti změnou rychlosti otáčení.

Dále bylo vyvinuto příčné honování, které má sjednocené otáčky obou kol a nahradilo tak předchozí princip bez řízeného pohybu. Může být použito jak pro jednotné honování, kde je použito pouze jedno kolo. Dále vícenásobné honování, které používá dvě honovací kola. Můžeme to rozdělit i na hrubovací a dokončovací kroky. Je zde přítomnost dvou vřeten pro rychlejší měnění.

Na ochranu mechanického přetížení honovacího nástroje jsou procesní síly neustále sledovány senzory. V případě potřeby upraví přísun.

Další velikou výhodou honování je dosažení vysokých zbytkových tlakových napětí, zejména při použití diamantu. Na povrchu je dosaženo až -1400 MPa. Na 20 μm od povrchu se tato hodnota ustálí na cca -200 MPa až do hloubky 90 μm. Díky tomu se dosahuje dobrého výkonu a vysoké životnosti ozubeného kola pro převodovky. [14]

3.2.1. Honování čelních ozubených kol převodovek s úpravou profilu zubů

Je dosahováno vysoké účinnosti a veliké kvality povrchu a může zlepšit odolnost proti únavě. Čelo ozubeného kola zabírá s evolventním ozubeným pastorkem. Princip je zobrazen na obrázku č. 16. Honovací kolo zapadá do čela ozubeného kola. Během procesu jsou zuby nástroje i obrobku neustále v kontaktu. Vztah mezi honovací frézou a obráběným kolem je následovný:

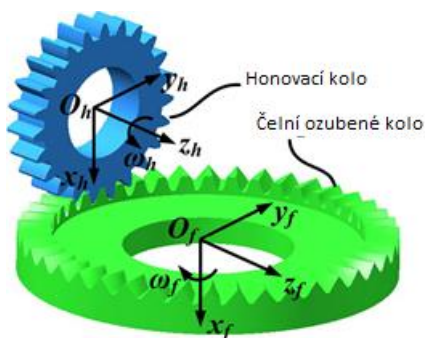
$$\frac{\omega_{\zeta}}{\omega_h} = \frac{N_h}{N_{\zeta}} \quad [-] \quad (8)$$

N_h počet zubů honovacího kola [-]

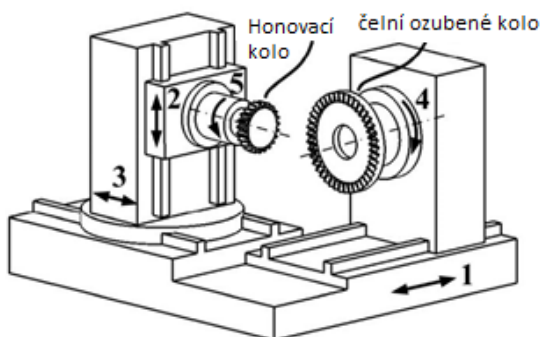
N_{ζ} počet zubů čelního ozubeného kola [-]

ω_h úhlová rychlost honovacího kola [rad·s⁻¹]

ω_{ζ} úhlová rychlost čelního ozubeného kola [rad·s⁻¹]



Obrázek 16. Proces honování [15]



1. Axiální přímočarý pohyb (X, D_x)
2. Radiální pohyb (Y, D_y)
3. Tangenciální přímočarý pohyb (Z, D_z)
4. Rameno ozubeného kola ($A, \varphi_{\check{c}}$)
5. Honovací rameno (C, φ_h)

Obrázek 17. 5osé centrum [15]

Pro honování se používá 5osé centrum, které bylo vyvinuto univerzitou Beihang. Má tři přímočaré osy (X, Y, Z) a dvě rotační osy (A, C). Axiální přímočarý pohyb D_x , radiální přímočarý pohyb D_y a tangenciální přímočarý pohyb D_z určují základní pozici honovacího kola s ohledem na kolo obráběné. Poměr rotačních pohybů φ_h a $\varphi_{\check{c}}$ je následující:

$$\frac{\varphi_{\check{c}}}{\varphi_h} = \frac{N_h}{N_{\check{c}}} \quad [-] \quad (9)$$

φ_h je rotační pohyb honovacího kola a $\varphi_{\check{c}}$ je rotační pohyb obrobku. Pokud nastavíme nástroj špatně v axiálním směru, tak chyba geometrie v horní části zubu bude nejvyšší a snižuje se ve směru hloubky zubů.

Pro rychlost otáček honovacího vřetena 91,3 ot/min a rychlost obráběného kola 50ot/min, kde axiální rychlost přísunu byla 0,012 mm/min, bylo měřeno 45 bodů na povrchu zubu. Maximální odchylka byla 15,1 μm . [15]

3.2.2. Pulsní elektrochemické honování kuželových kol (PECH)

Oproti dokončování čelních ozubených kol, jsou kuželová kola velice náročná na dokončování kvůli jejich složitosti. PECH je hybridní superfinišování s kombinací elektrochemické úpravy a honování. Výhodou je schopnost dokončit obrobek jakékoliv tvrdosti. Hlavní nevýhodou je pasivace anodického obrobku vzhledem ke tvorbě vrstvy oxidu kovu v důsledku vývoje kyslíku během elektrolytického procesu rozpouštění. Honování je potřebné k odstranění pasivační vrstvy oxidu kovu na bocích zubů.

Kalení honovacího kola 20MnCr5 plazmovou nitridací

Provádí se za použití doutnavého výboje plazmové nitridace. Před plazmovou nitridací se honovací kolo vyčistí plazmovou směsí plynu 75 % argonu a 25 % vodíku po dobu 90 minut. Povrchová vrstva honovacího kola se obohatí ionty dusíku během termochemického zpracování použitím 75 % dusíku a 25 % vodíku o 5 mbar tlaku, teplotě 450–550 °C a proudu 5 A po dobu 6 hodin. Po procesu nitridace v plazmě se kolo pomalu schladí na pokojovou teplotu. Podle Vickersovy stupnice tvrdosti dosahuje povrch zubů až 900 HV. Touto úpravou se dosahuje lepší odolnosti proti opotřebení, odolnosti proti korozi a zvýšení pevnosti v ohybu u kořene zubu honovacího kola. (Obr. 18)



Obrázek 18. a) bez úpravy, b) s úpravou po dlouhém používání PECH [18]

Kola dokončovaná těmito kalenými honovacími koly dosahují až o 50 % lepší drsnosti povrchu. Užití nekaleného kola v PECH odstraní velmi malé množství materiálu pouze na určitých místech zubu, zatímco použití kaleného kola je možné odstranit více materiálu téměř po celém zubu a nezanechává škrábance. To vede k snížení maximální drsnosti povrchu zubu, tišší provoz a lepší provozní výkonnost. Tvrdost honovacích kol je tedy důležitá v dokončování ozubených kol. [16]

Tabulka 3. Drsnost [16]

Ra [μm]	Před honováním, Ra [μm]	Po honování, Ra [μm]
Neupravené honovací kolo	1,95	1,14
Upravené honovací kolo	1,65	0,87

Tabulka 4. Tvrdost [16]

	Po honování, Vickers [HV]
Neupravené honovací kolo	630-640
Upravené honovací kolo	713-730

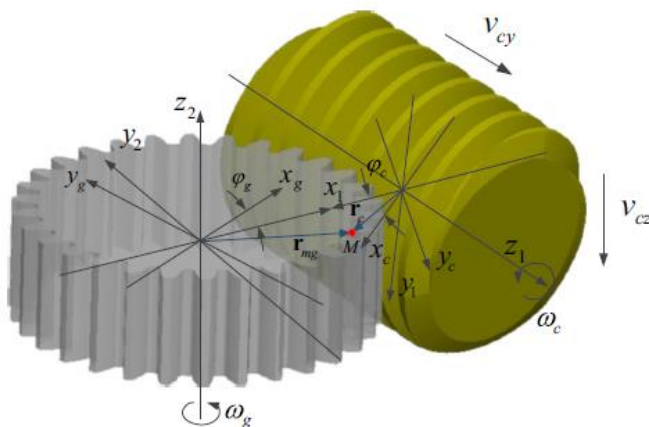
3.2.3. Výkonné honování ozubení převodovek - drsnost

Drsnost povrchu zubu má velký vliv na kontakt a stav mazání na povrchu zubu při záběru. Při honování ozubených kol převodovky automobilů se dosahuje vysoké přesnosti a drsnosti povrchu R_a až $0,230 \mu\text{m}$ podle výpočtů, ale podle experimentů se dosahuje drsnosti $R_a = 0,233 \mu\text{m}$, což je o něco větší než teorie. Tato odchylka může být způsobena vibracemi honovacího stroje a dalšími nekontrolovanými vnějšími faktory. Veliký vliv na drsnost povrchu má zkřížení os Σ . Čím větší je zkřížení os, tím roste relativní rychlost a klesá hodnota drsnosti. Ovšem to platí pouze v rozmezí $0^\circ - 8^\circ$. [17]

3.2.4. Modifikované honování vnějšího ozubení

Honovací kolo má tvar šneku. Jedná se o velmi jednoduchý způsob dokončování. Hlavní výhodou je použití šnekového honovacího kola pro více ozubených kol různých parametrů, což má za následek snížení nákladů. Další plus tohoto honování je, že zabírá pouze jeden závit šnekového honovacího kola na jeden zub. To znamená, že kvalita povrchu jednoho zubu není ovlivněna zubem druhým.

Cílem je vyřešení problému s konkávností zubu. Poloha dotyku obrobku a nástroje je dána úhlovými rychlostmi obou kol. Existují však ještě další dva pohyby. Přísvuný pohyb v_{cy} ve směru osy šneku a pohyb v_{cz} ve směru osy ozubeného kola (Obr. 19). [18]



Obrázek 19. Pohyby modifikovaného honování [18]

3.3. Broušení

Broušení je dokončovací metoda, která se používá pro odstranění nepřesností po předchozích operacích, jako například tepelné zpracování a obrábění. Odebírají se drobné kousky třísky brousicím kotoučem. Brousicí kotouč je vlastně spojení tvrdých zrn brusiva. Užívá se vysokých řezných rychlostí, někde v rozmezí 30 – 80 m.s⁻¹. Vysokých řezných rychlostí se používá z důvodu, aby brousicí zrna byla schopná odebírat třísku. Vřeteno musí být kvalitně uložené, chod musí být bez rázů a vibrací, aby bylo dosaženo požadované přesnosti. Dále se musí přivádět do místa dotyku chladicí kapalina. Můžeme brousit kalené, cementované součásti, ale i slinuté karbidy a další tvrdé materiály, a to jak kovové, tak nekovové. Je možné dosahovat několika drsností. Při použití odvalovacích brusek se dosahuje drsnosti 0,8 až 1,6 μm a při použití přesných brusek se dosahuje drsnosti 0,2 až 0,4 μm. Používá se třech základních typů broušení: [3] [4] [19] [20] [21]

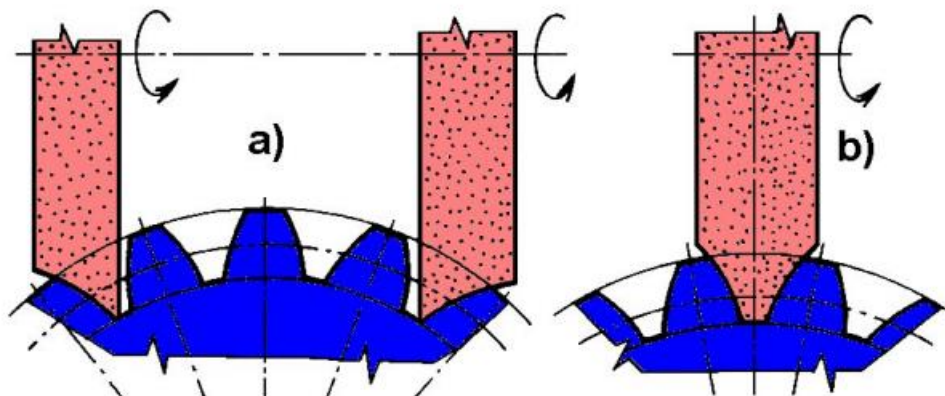
- 1) broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči
- 2) broušení dělicím způsobem s odvalem brousicího kotouče
- 3) broušení odvalem brousicího kotouče šnekového tvaru

3.3.1. Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči

Tento způsob broušení je sice méně přesný, ale velmi produktivní. Brousicí kotouč má tvar boku jednoho zubu, kterým se brousí odpovídající strany všech zubů. To znamená, že je potřeba jeden kotouč na levý bok a druhý kotouč na bok pravý. Nebo se používá brousicí kotouč ve tvaru zubové mezery, díky čemuž se brousí oba boky současně (Obr. 20). Po obroušení jednoho boku nebo zubové mezery se ozubené kolo automaticky pootočí o zubovou rozteč a brousí se další mezera či bok.

Kotouče se tvarují a přebroušují diamantovým orovnávačem podle šablony nebo pomocí odvalovacího způsobu speciálním tvarovým zařízením. Takto můžeme brousit kola o průměru 50 až 450 mm. Toto broušení je velice účinné, ale bohužel nezajišťuje

vysokou přesnost. Kotouče musí mít přesný profil boků zubů pro každé kolo, což má za následek i vyšší provozní náklady. [4]



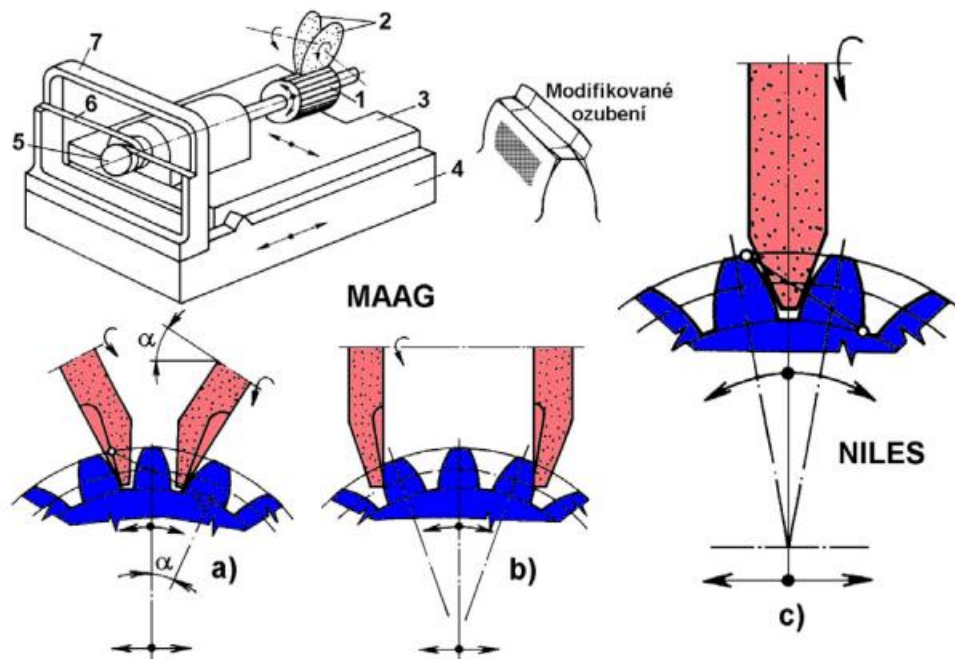
Obrázek 20. Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči: a) dva kotouče, b) jeden kotouč [4]

3.3.2. Broušení dělicím způsobem s odvalem brousícího kotouče

Broušení probíhá odvalem zubu po dvou brousících kotoučích a tato varianta se nazývá Maag. Nebo se odvaluje po jednom brousícím kotouči, a to se nazývá Niles. U způsobu Maag je odvalovací pohyb složen z příčného a rotačního pohybu obrobku. Tím je zajištěno obrobení celého boku zubu. Odvalovací pohyb je způsoben otáčením ozubeného kola kolem osy současně s posuvem ve směru osy brousícího kotouče. Odvinování ocelových pásů je potřeba pro otáčení obroku. Střídavým pohybem příčného suportu se zařizuje odvalování a broušení zubové mezery.

Po obroušení jedné mezery se ozubené kolo opět o jednu rozteč pootočí. Po každém pootočení se brousící kotouče orovňávají. V případě, že ozubené kolo má rozteč větší jak 9 mm, je možné v jedné mezeře brousit dvěma kotouči, jinak se kotouče umísťují o jednu rozteč. Přesnost tohoto způsobu broušení se pohybuje kolem 2. až 4. třídy přesnosti. Brousit lze několika možnostmi. Buďto kotouče jsou skloněné o úhel α nebo jsou kolmo postavené (Obr. 21). Při použití broušení o skloněném úhlu je možné brousit jak hranou kotouče, tak i jeho plochou. Postup kolmo postavených kotoučů je

efektivnější a dosahuje se vyšší jakosti povrchu. Broušení ozubeného kola se šikmými zuby, se brousí stejným způsobem, jen se vřeteník pootočí pod úhel sklonu zubů. [3] [4]



Obrázek 21. Broušení odvalem broušícího kotouče: a) broušení Maag skloněnými kotouči, b) broušení Maag kolmo postavenými kotouči, c) broušení Niles, 1- obrobek, 2- broušící kotouče, 3- příčný suport, 4- podélný suport, 5- odvalovací kotouč, 6- ocelový pás, 7- stojan odvalovacího zařízení [4]

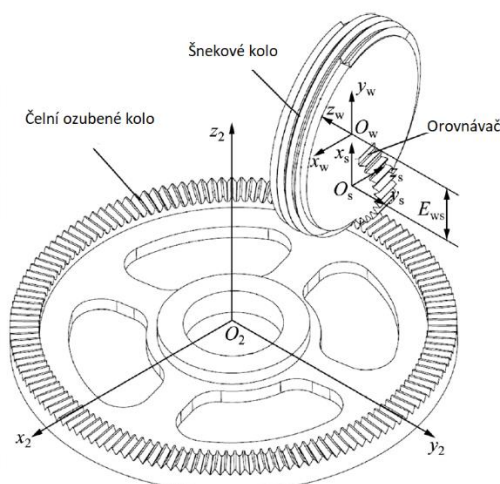
3.3.3. Broušení odvalem broušícího kotouče šnekového tvaru

Tento způsob je podobný odvalovacímu frézování, který je plynulý a bez dělení. Místo frézy však používáme jednochodého nebo dvouchodého broušícího šneka. Průměr šneku bývá 350 až 400 mm a orovná se diamantovým orovnačem do požadovaného přesného tvaru. Tato metoda se používá hlavně pro broušení ozubených kol malých modulů. Důležitým aspektem je závislost pohybu nástroje a obrobku. Tento způsob se také vyznačuje nízkými výrobními časy, proto se často využívá v sériové výrobě. Výrobní časy se pohybují 5 až 10 s na 1 cm délky zubu pro kola s modulem od

1,5 do 4 mm. Dosahuje se tříd přesnosti v rozmezí 3 až 5. Můžeme také obrábět čelní ozubená kola. Šnekové kolo i ozubené kolo se otáčí kolem své osy, což má za následek souvislý pohyb a broušení obrobku (Obr. 22). [3] [4] [22]



Obrázek 22. Odvalovací broušení kotoučem šnekového tvaru [4]



Obrázek 23. Odvalovací broušení čelního ozubeného kola kotoučem šnekového tvaru [22]

3.3.4. Broušení nástroji z polykrystalického kubického nitridu bóru (CBN)

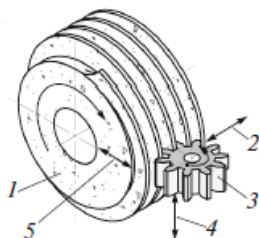
Nástroje z CBN mají vysokou odolnost proti opotřebení a velikou tepelnou vodivost, která má pozitivní vliv na zbytkové napětí ozubeného kola. CBN se váže například s bronzem a dalšími kovy. Zbytková napjatost zubu je závislá na rychlosti posuvu. Přídavek na broušení se tímto materiálem odstraní v jednom kroku a není potřeba proces opakovat vícekrát. Avšak maximální hloubka odběru je 5,5 μm . [23]

3.3.5. Broušení superabrazivními kotouči

MAAG – brousící kotouče se nejčastěji umísťují pod úhly 0, 15° nebo 20°. Dosahuje se 3. nebo 4. třídy přesnosti a $R_a = 1 - 0,2 \mu\text{m}$. Zlepšení účinnosti a kvality obrábění lze dosáhnout použitím superabrazivních materiálů brousícího kotouče, například CBN. Nezpůsobují žádné popáleniny na povrchu převodových kol a poskytují 1,2 krát větší míru odstranění materiálu. [24]

3.3.6. Broušení válcových ozubených kol

Planetové převodovky se používají v automatických převodovkách pro autobusy a nákladní automobily. Přenášejí vysoké momenty při nízkých rychlostech. Pro snížení odstředivých sil se dokončují kola s vysokou přesností a to třídou 5 - 6 a drsností $R_a = 0,8 - 2 \mu\text{m}$. Kinematika je znázorněna na obrázku č. 24. Při zajištění interakce všech pohybů se dosahuje velice vysoké přesnosti a účinnosti. Používá se brousícího šneku se zrnitostí 38 %. Tato metoda kvůli vysokým nákladům brousícího šneku je vhodná pro sériovou výrobu ve větším měřítku. [25]

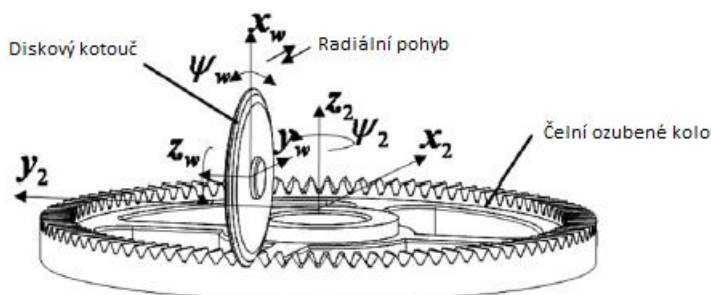


Obrázek 24. Broušení válcového ozubeného kola, 1- brousící kotouč ve tvaru šneku, 2- tangenciální pohyb, 3- ozubené kolo, 4- axiální pohyb, 5- radiální pohyb [25]

3.3.7. Modifikované broušení čelního ozubení diskovým kolem

Tato metoda spočívá v principu broušení zubové mezery brousícím kotoučem, který vznikl jako rotační plocha zubu kolem osy z_w . Brousící kotouč se otáčí kolem své osy z_w a koná ještě přímočarý rovinný pohyb. Čelní ozubené kolo se po obroušení zubové mezery pootočí kolem své osy z_2 dokud se neobrousí všechny zubové mezery. Princip je

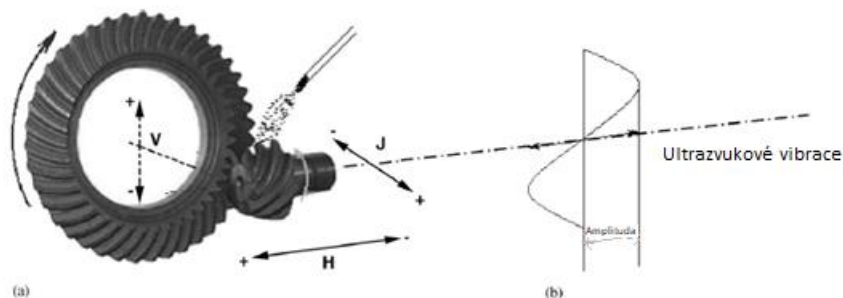
také zobrazen na obrázku č. 25. Maximální odchylka od požadovaného povrchu je asi $2,62 \mu\text{m}$ a výrobní čas jednoho zubu je v průměru 1,5 minuty. [26]



Obrázek 25. Princip broušení čelního ozubeného kola [26]

3.4. Lapování

Lapování je dokončovací technologie, která zlepšuje drsnost povrchu tepelně zpracovaných ozubených kol. Používá se litinového ozubeného kola, které modulově odpovídá kolu obráběnému. Tyto dvě kola společně zabírají. Hnaným kolem je litinové kolo a obráběné je brzděno a zároveň vykonává kmitavý pohyb. Principem je hlazení povrchu jemným volným brusivem, které je ve formě lapovací pasty, nebo je přidáváno do oleje či petroleje. Používáme karbid křemíku nebo umělý korund jako brusivo. Přídavky na lapování jsou velice malé, a to v rozmezí $0,02$ až $0,05 \text{ mm}$ a obvodová rychlost se pohybuje do 1 m/s . Dosahuje se velice vysoké kvality povrchu. $R_a = 0,2$ až $0,5 \mu\text{m}$ a IT1 až IT3. [19] [27] [3]



Obrázek 26. a) klasické lapování, b) ultrazvukové lapování [28]

3.4.1. Ultrazvukové asistované lapování

Tento způsob snižuje výrobní čas, pnutí v obrobku a zlepšuje povrch obrobku, kvalitu a životnost kola, což znamená vyšší odolnost proti opotřebením. Jedná se o hospodárné dokončování. Ultrazvukové vibrace pastorku o frekvenci 20 000 Hz pomáhají rychlejšímu odebrání materiálu. Relativní posun obou kol a vibrace odebírají materiál z obou kol, jelikož jejich tvrdost je přibližně stejná. Klasickým lapováním se dosahuje většinou drsnosti okolo $Ra = 0,33 \mu\text{m}$, zatímco ultrazvukovým lapováním se dosahuje $Ra = 0,2 \mu\text{m}$. [28]

3.5. Zvýšení životnosti ozubených kol závodních automobilů kryogenickou úpravou

Kryogenická úprava se používá po tepelném zpracování na neúplnou přeměnu austenitu, používá se však už jako běžná úprava. Tento princip spočívá v ochlazení materiálu na velmi nízké teploty, čímž dochází k přeuspořádání atomové struktury, avšak bez jejího poškození. Díky tomu se dosahuje vyšší uniformity atomů, což má za následek změnu několika vlastností materiálu. Zajišťuje vyšší odolnost proti opotřebením a delší životnost. Závodní vozidlo Formule Brabham, provozované společností Birrana Racing, mělo náchylná ozubená kola na únavové poškození po malých počtech cyklů, kryogenickou úpravou se zlepšila životnost o značnou dobu. [29] [33]

3.6. Valivá kontaktní únava ozubených kol v závodních převodovkách

RCF (rolling contact fatigue) neboli valivá kontaktní únava je jedním z hlavních zdrojů poškození čelních ozubených kol. Je však možné předcházet poškození kalením, vytvořením tenké povrchové vrstvy. Ta slouží proti opotřebením, zlepšení korozního chování a proti únavě. Vysoké zbytkové tlakové napětí na povrchu ve skutečnosti snižuje RFC trhliny. Nejlépe této únavě odolávají ozubená kola ze slitin titanu, které mají nejlepší poměr pevnosti ke hmotnosti všech kovových materiálů. [30] [31]

Tabulka 5. Přehled dokončovacích metod a dosahovaných parametrů

Ševingování	Ra (μm)	Dosahovaná přesnost (IT)	Broušení	Ra (μm)	Dosahovaná přesnost (IT)
Příčné	0,4÷0,6	4÷6	Dělicím způsobem tvarovými kotouči	0,2÷0,8	4÷6
Diagonální			Dělicím způsobem s odvalem brousícího kotouče	0,2÷0,8	2÷4
Tangenciální			Odvalem brousícího kotouče šnekového tvaru		
Zapichovací			Broušení nástroji z CBN	0,2÷0,8	3÷4
Ševingování vnitřních ozubených kol			Broušení superabrazivními materiály		
Honování			Broušení válcových ozubených kol	0,8÷2	5÷6
Honování čelních ozubených kol převodovek s úpravou profilu zubů	0,3	0,5÷0,6	Modifikované broušení čelního ozubení diskovým kolem	0,2÷0,8	2÷4
Pulsní elektrochemické honování kuželových kol	0,8		Lapování		
Výkonné honování ozubení převodovek	0,2		Ultrazvukové asistované lapování	0,2	1÷3
Modifikované honování vnějšího ozubení	0,3				

4. Řezné kapaliny

Řezné kapaliny jsou nedílnou součástí dokončování ozubených kol. Mají jak chladicí účinek, tak i mazací, většinou však jeden z těchto účinků převažuje. Dají se rozdělit na několik druhů, a to na vodní roztoky, emulzní kapaliny, mastné oleje, zušlechtěné řezné oleje, rostlinné oleje a syntetické kapaliny.

4.1. Vodní roztoky

Jedná se o nejjednodušší a zároveň i nejlevnější řezné kapaliny. Základem je voda, která však potřebuje několik přísad na zlepšení smáčivosti, proti korozi a pěnivosti. Mají dobrý chladicí efekt, ovšem mazací více méně žádný.

4.2. Emulzní kapaliny

Nejlépeším příkladem je voda a olej. Jedná se o dvě kapaliny, které jsou nesmíchatelné. Proto se musí přidávat takzvané emulgátory, jenž tyto kapaliny smíchají. Mají jak chladicí, tak mazací účinek. Který z těchto účinků převažuje, závisí na množství emulze v roztoku. Čím je emulze více, tím je lepší mazací účinek.

4.3. Zušlechtěné řezné oleje

Jedná se o kapaliny, které jsou na bázi minerálních olejů. Přidávají se různá maziva, organické sloučeniny či mastné látky.

Maziva vytvářejí mezní vrstvu, která odolává tlakům a zvyšuje mazací schopnost. Jedná se například o grafit a sirník molybdenu.

Organické sloučeniny jsou na bázi síry, fosforu či chloru. Vytvářejí vrstvu kovových mýdel, díky čemuž zlepšují mazací účinek.

Mastné látky jsou například oleje nebo syntetické estery. Zlepšují přilnavost oleje ke kovu a mazací účinky.

4.4. Syntetické kapaliny

Mají výborné mazací i chladicí schopnosti. Jedná se o rozpouštědla, která ve vodě emulgují. Řadíme je mezi hospodárné kapaliny, odvádějí teplo a mají jednoduchou přípravu. V těchto kapalinách je možné rozpustit oleje, tím vznikají polysyntetické kapaliny, které mají výborné mazací vlastnosti. [32]

Tabulka 6. Materiály pro dokončovací operace

Materiál	Vlastnosti	Pro materiály	Použití v metodách
Umělý korund (Al ₂ O ₃)	Vysoká tvrdost, křehkost	oceli, temperované litiny, tvrdé bronzi, kalené oceli	Broušení, honování, lapování, švingování
Karbokorund (SiC)	vysoká pevnost, vysoká tvrdost	měkké oceli, litiny, slitiny hliníku, slitiny mědi,	Broušení, honování, lapování, švingování
Karbid Boru (B ₄ C)	vysoká tvrdost, vysoká chemická odolnost	tvrdé materiály, slinuté karbidy, rychlořezné oceli	Lapování
Diamant	lehký, vysoká tvrdost, dobrá tepelná vodivost, nižší tepelná odolnost, vyšší chemická odolnost	slinuté karbidy, rychlořezné oceli	Broušení, honování, lapování, švingování
Kubický nitrid boru (CBN)	syntetický, vysoká tvrdost, vysoká chemická stálost, vysoká tepelná odolnost, lehký	zušlechtěné kalené oceli, slinuté karbidy, rychlořezné oceli	Broušení, honování, lapování, švingování
Jemnozrnná perlitická nebo feritická litina	menší tvrdost, dobré mechanické vlastnosti	mědi, měkké oceli	Lapování
Tvrdě chromované nástroje	vysoká tvrdost, odolnost proti opotřebení	tvrdé materiály	Lapování

5. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo shrnout metody dokončování ozubených kol, a to i v automobilovém průmyslu. V úvodu práce lze najít rozdělení ozubených kol a jejich použití. Dále pak jejich výrobu s využitím jednotlivých metod jako jsou frézování, obrážení a protahování, které byly podrobněji popsány v první třetině této práce.

Zbývající část je rozdělena na čtyři skupiny dokončovacích metod. Na švingování, honování, broušení a poslední způsob, kterým je lapování.

Švingování je dokončovací operace pro nekalená kola nebo pro kola po cementaci před kalením. Je zapotřebí přesného švingovacího kola pro dané moduly, takže tato metoda se používá především v hromadné výrobě, kvůli vyšším nákladům na přesnost švingovacího kola. Dosahuje se vcelku dobré kvality.

Honování je v podstatě speciální druh švingování. Používá se však pouze pro kalená kola okamžitě po kalení. Je schopné dokončit ozubená kola jakékoliv tvrdosti, díky použití abrasivních materiálů. Při honování šnekovým kolem, je možné jedním šnekem honovat více ozubených kol o různých modulech, což má za následek snížení nákladů. Je možné používat i při malosériové výrobě.

Broušením ozubených kol se dosahuje různých přesností. Pro broušení dělicím způsobem je drsnost povrchu horší, což je zapříčiněno opotřebováním brusného kotouče nerovnoměrným způsobem. Tento způsob je také dražší, ale velice produktivní, takže se spíše používá v hromadné výrobě. Ostatní způsoby broušení jsou už velice přesné a dosahují vysoké přesnosti povrchu. Tato metoda se používá především v hromadné a sériové výrobě. Jelikož se většinou po každém broušení zubové mezery musí brusný kotouč zarovnat, následkem je zvýšení nákladů.

Lapování se používá pro tepelně zpracovaná kola. Dosahuje se vysoké přesnosti povrchu, avšak ozubená kola pro lapování musí být vyrobena co nejpřesněji, jelikož lapováním se nedá upravovat tvar. Používá se litinových kol, která zabírají s obráběným kolem za přísunu brusiva. Tento způsob je hospodárný a může se používat i v malosériové výrobě. Dosahuje se i malých výrobních časů.



V tabulce č. 5 jsou uvedeny jednotlivé drsnosti a přesnosti povrchů ozubených kol pro jednotlivé metody. Z této tabulky je vidět, že nejlepší drsností povrchu se dosahuje metodou broušení a lapování.

Jednotlivé materiály a jejich vlastnosti jsou zobrazeny v tabulce č. 6. Pro každý materiál jsou uvedeny i jednotlivé metody použití.

Z mého pohledu je nejlepší variantou dokončování ozubených kol buďto broušení nebo lapování. Těmito metodami a jejich dílčími způsoby dosahujeme vysokých přesností a malých drsností povrchu. Pro dokončování jednotlivých kusů bych volil lapování, avšak pro dokončování více kusů bych volil spíše broušení.

Podle mého názoru vývoj dokončování ozubených kol směřuje stále dopředu a dosahuje se vyšších přesností povrchu a lepších drsností. Nejvíce však půjde dopředu vývoj materiálů a podle toho se bude odvíjet dokončování ozubených kol.

6. Seznam použité literatury

- [1] ANON., nedatováno. Ozubená kola s přímým ozubením - Matis s.r.o. [online] [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.matis.cz/cs/kategorie/ozubena-kola-s-primym-ozubenim>
- [2] POSPÍCHAL, Jaroslav. Technické kreslení. 4., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05595-3.
- [3] MÁDL, Jan. Technologie obrábění. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN ISBN978-80-01-03752-2.
- [4] Humár, A. Technologie I. – 2. Část [online]. Technologie pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004. Dostupné z WWW: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf
- [5] ANON., nedatováno. Kotoučovou Frézou | TumliKOVO:Technologie strojního obrábění kovů [online]. [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/procesy/ozubeni/frezovanim/kotoucovou/>
- [6] ANON., nedatováno. Frézování ozubených kol [online]. B.m.: coptkm. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=25247&revision=-1&instance=2>
- [7] ANON., nedatováno. Technologie výroby ozubených kola odvalováním | TumliKOVO:Technologie strojního obrábění kovů [online] [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/vyroba-ozubeni-odvalovaci-frezou/#more-2101>
- [8] MRKVICA, Ivan, 2011. *Současné trendy v obrábění ozubených kol* [online]. 2011. B.m.: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostravě. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/Mrkvica-Soucasne-trendy-v-obrabeni-ozubenych-kol.pdf>
- [9] ANON., 2015. Protahování kuželových ozubených kol | M.L. Gear Designs [online] [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1310/protahovani-kuzelovych-ozubenych-kol>
- [10] ANON., nedatováno. ELUC [online] [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1396>
- [11] BIANCO, Gianfranco a Stephen P. RADZEVICH, 2010. *Precision Gear Shaving* [online]. New York, UNITED STATES: Nova Science Publishers, Incorporated [vid. 2018-05-21]. ISBN 978-1-61470-604-5. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=3020209>
- [12] MRKVICA I.: Speciální technologie – Výroba ozubených kol II. Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 1. vydání, 2009, ISBN 978-80-248-2134-4



- [13] ANON., 2015. Honování. Blog.cz [online] [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1503/honovani>
- [14] KARPUSCHEWSKI B., H.-J. KNOCHE a M. HIPKE, 2008. Gear finishing by abrasive processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2008.
- [15] WANG, Yanzhong, Zhou LAN, Liangwei HOU, Xiaomeng CHU a Yongyao YIN, 2017. An efficient honing method for face gear with tooth profile modification. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 90(1–4), 1155–1163. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-016-9447-x
- [16] Pathak S., Jain N.K., Palani I.A., 2015. Effect of honing gear hardness on microgeometry and surface quality improvement of straight bevel gears in PECH process | SpringerLink [online] [vid. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-015-7596-y>
- [17] YUAN, Bin, Jiang HAN, Dongling WANG, Yonggang ZHU a Lian XIA, 2017. Modeling and analysis of tooth surface roughness for internal gearing power honing gear. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering [online]. 39(9), 3607–3620. ISSN 1678-5878, 1806-3691. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-017-0791-z
- [18] YU, Bo, Zhaoyao SHI a Jiachun LIN, 2017. Topology modification method based on external tooth-skipped gear honing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 92(9–12), 4561–4570. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-0463-2
- [19] ANON., 2013. Dokončovací operace ozubení | M.L. Gear Designs. Mlgeardesigns [online] [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1310/dokoncovaci-operace-ozubeni>
- [20] ANON., nedatováno. ELUC [online] [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1241>
- [21] ANON., nedatováno. ELUC [online] [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1242>
- [22] TANG, Jin-yuan, Wei CUI, Heng ZHOU a Feng YIN, 2016. Integrity of grinding face-gear with worm wheel. 2016. B.m.: J. Cent. South Univ.
- [23] DENKENA, B., D. PREISING a S. WOIWODE, 2015. Gear profile grinding with metal bonded CBN tools. Production Engineering [online]. 9(1), 73–77. ISSN 0944-6524, 1863-7353. Dostupné z: doi:10.1007/s11740-014-0588-1
- [24] RYABCHENKO, S. V., 2014. Gear grinding with superabrasive dish wheels. *Journal of Superhard Materials* [online]. 36(6), 421–427. ISSN 1063-4576, 1934-9408. Dostupné z: doi:10.3103/S1063457614060082



- [25] KALASHNIKOV, A. S., Yu A. MORGUNOV a P. A. KALASHNIKOV, 2016. Producing cylindrical gears by high-speed grinding. *Russian Engineering Research* [online]. 36(5), 400–403. ISSN 1068-798X, 1934-8088. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X16050075
- [26] TANG, Jin-yuan, Feng YIN a Xing-ming CHEN, 2013. The principle of profile modified face-gear grinding based on disk wheel. *Mechanism and Machine Theory*. 2013.
- [27] ANON., nedatováno. ELUC [online] [vid. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1385>
- [28] WEI, B. Y., X. Z. DENG a Z. D. FANG, 2007. Study on ultrasonic-assisted lapping of gears. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 47(12), 2051–2056. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.11.003
- [29] JORDINE, A., 1996. Increased life of carburised race car gears by cryogenic treatment. *International Journal of Fatigue* [online]. 18(6), 418. ISSN 0142-1123. Dostupné z: doi:10.1016/0142-1123(96)89670-8
- [30] BARAGETTI, S., S. CAVALLERI a F. TORDINI, 2011. A Numerical Method to Predict the RCF Behaviour of PVD-coated Transmission Gears and Experimental Results. *Procedia Engineering* [online]. 10, 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM11), 1485–1490. ISSN 1877-7058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2011.04.248
- [31] LUO, J., H. DONG a T. BELL, 2005. *Model-based contact fatigue design of surface engineered titanium gears - ScienceDirect* [online] [vid. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025605001102>
- [32] Humár, A. *Technologie I. – 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [33] ANON., nedatováno. kryogenické zpracování. *cryogenic.info* [online]. [vid. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://kryogenika.cz/kryogenicke-zpracovani/>

7. Seznam obrázků

Obrázek 1. Typy ozubených kol [2]	10
Obrázek 2. Frézování ozubení kotoučovou frézou dělicím způsobem [5]	13
Obrázek 3. Frézování stopkovou frézou dělicím způsobem [6]	13
Obrázek 4. Frézování odvalem [7]	15
Obrázek 5. Vytvoření evolventy [4].....	15
Obrázek 6. Vyklonění vřeteníku při odvalovacím frézování [4]	17
Obrázek 7. Kinematika pohybů metodou Maag [4]	18
Obrázek 8. Kinematika pohybů metodou Fellows [4]	19
Obrázek 9. Ševingovací kola [4]	21
Obrázek 10. Nástroj (ševingovací kolo) a postup při ševingování [10]	22
Obrázek 11. Příčné ševingování [11]	23
Obrázek 12. Diagonální ševingování [11]	23
Obrázek 13. Závislost diagonálního úhlu na délce mezi dvěma zuby a úhlu zkřížení os [11]	24
Obrázek 14. Tangenciální ševingování [11].....	25
Obrázek 15. Zapichovací ševingování [11]	27
Obrázek 16. Proces honování [15]	31
Obrázek 17. Sose centrum [15].....	31
Obrázek 18. a) bez úpravy, b) s úpravou po dlouhém používání PECH [18]	33
Obrázek 19. Pohyby modifikovaného honování [18]	34
Obrázek 20. Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči: a) dva kotouče, b) jeden kotouč [4]... 36	
Obrázek 21. Broušení odvalem broušícího kotouče: a) broušení Maag skloněnými kotouči, b) broušení Maag kolmo postavenými kotouči, c) broušení Niles, 1- obrobek, 2- broušící kotouče, 3- příčný suport, 4- podélný suport, 5- odvalovací kotouč, 6- ocelový pás, 7- stojan odvalovacího zařízení [4].....	37
Obrázek 22. Odvalovací broušení kotoučem šnekového tvaru [4]	38
Obrázek 23. Odvalovací broušení čelního ozubeného kola kotoučem šnekového tvaru [22]	38
Obrázek 24. Broušení válcového ozubeného kola, 1- broušící kotouč ve tvaru šneku, 2- tangenciální pohyb, 3- ozubené kolo, 4- axiální pohyb, 5- radiální pohyb [25].....	39
Obrázek 25. Princip broušení čelního ozubeného kola [26]	40
Obrázek 26. a) klasické lapování, b) ultrazvukové lapování [28]	40

8. Seznam tabulek

Tabulka 1. Rozdělení fréz podle počtu zubů [5].....	12
Tabulka 2. Oblast použití kol s různými přesnostmi [11]	28
Tabulka 3. Drsnost [16]	33
Tabulka 4. Tvrdost [16]	33
Tabulka 5. Přehled dokončovacích metod a dosahovaných parametrů	42
Tabulka 6. Materiály pro dokončovací operace	44