



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VÝROBA OZUBENÍ KUŽELOVÉHO SOUKOLÍ

PRODUCTION OF BEVEL GEARS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Tomáš VONDRA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Milan KALIVODA

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2014/15

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Tomáš Vondra

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Výroba ozubení kuželového soukolí**

v anglickém jazyce:

#### **Production of Bevel Gears**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod.
2. Teorie kuželového ozubení.
3. Možnosti výroby na univerzálních strojích.
4. Možnost výroby 3D tiskem.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.
6. Diskuze.
7. Závěr.

Cíle bakalářské práce:

Porovnání možností technologických procesů současné doby ohledně výroby kuželového ozubení.

Seznam odborné literatury:


1. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2005. 272 s. ISBN 80-214-3068-0.
2. SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 651. ISBN 0-19-514206-3.
3. GIBSON, Ian, David W. ROSEN and Brent STUCKER. Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. P. 459. ISBN 14-419-1120-0.
4. PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.
5. JUROVÁ, Marie. Organizace přípravy výroby. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 100 s. ISBN 978-80-214-3946-7.

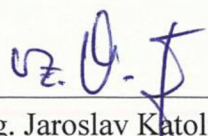
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21.11.2014



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je podat základní informace o teorii a výrobě kuželových ozubených kol. Práce také obsahuje návrh plastového kuželového soukolí s přímými zuby a porovnání dvou různých výrobních technologií, jmenovitě obrázení dvěma noži a FDM (Fused Deposition Modeling).

### **Klíčová slova**

kuželové ozubené kolo, obrábění, Gleason, Oerlikon, Klingelberg, Rapid Prototyping, FDM

## **ABSTRACT**

The objective of this bachelor's thesis is to provide general information about the theory and production of bevel gears. The thesis also contains a proposal of plastic bevel gears with straight teeth and comparison of two different production technologies, namely slotting and FDM (Fused Deposition Modeling).

### **Key words**

bevel gear, machining, Gleason, Oerlikon, Klingelberg, Rapid Prototyping, FDM

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VONDRA, Tomáš. *Výroba ozubení kuželového soukolí*. Brno 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 57 s. 7 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výroba ozubení kuželového soukolí** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Tomáš Vondra

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Milanu Kalivodovi z VUT v Brně za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Dále děkuji panu Ing. Radoslavovi Cikánkovi z firmy Bondy, s. r. o., za návrh cenové nabídky, včetně časové náročnosti a za cenné rady z praxe.

Tímto bych chtěl také poděkovat panu Lukášovi Jablončíkovi z firmy ultimat3D s. r. o. za možnost tisku kuželového ozubeného soukolí.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE .....	3
PROHLÁŠENÍ .....	4
PODĚKOVÁNÍ.....	5
OBSAH.....	6
1 TEORIE OZUBENÍ KUŽELOVÝCH KOL .....	9
1.1 Základní dělení kuželových soukolí .....	11
1.1.1 Rozdělení podle vzájemné polohy os .....	11
1.1.2 Rozdělení podle druhu ozubení .....	11
1.2 Druhy ozubených věnců .....	13
1.3 Porovnávací (virtuální a bivirtuální) kola.....	15
1.4 Rovinné kolo .....	15
1.5 Silové poměry .....	16
1.6 Interference a korekce .....	18
1.7 Poškození zubů .....	19
1.8 Materiály kuželových ozubených kol .....	20
1.9 Měření kuželových ozubených kol .....	21
1.9.1 Měření zubu v konstantní výšce .....	21
1.9.2 Měření dvoubokého odvalu za otáčku a za rozteč.....	22
2 VÝROBA OZUBENÍ KUŽELOVÝCH KOL .....	23
2.1 Obrábění kuželových kol s přímými a se šikmými zuby.....	23
2.1.1 Frézování tvarovou frézou .....	23
2.1.2 Frézování nožovými hlavami .....	24
2.1.3 Obrázení podle šablony .....	25
2.1.4 Obrázení dvěma noži .....	25
2.1.5 Protahování .....	27
2.2 Obrábění kuželových kol se zakřivenými zuby.....	27
2.2.1 Způsob Gleason .....	28
2.2.2 Způsob Oerlikon .....	30
2.2.3 Způsob Klingelnberg .....	32
2.3 Rapid Prototyping (pouze metoda FDM) .....	33
3 NÁVRH KUŽELOVÉHO SOUKOLÍ A TECHNOLOGIE VÝROBY .....	36
3.1 Výpočty rozměrů kuželového soukolí N s přímými zuby .....	36

---

3.2	Výroba soukolí obrážením dvěma noži .....	39
3.3	Výroba soukolí technologií FDM.....	40
3.3.1	Výpočet virtuálního soukolí a tvorba modelu .....	41
3.3.2	Tisk součásti .....	44
4	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	47
4.2	Technické zhodnocení .....	47
4.2	Ekonomické zhodnocení.....	47
5	DISKUZE .....	50
	ZÁVĚR.....	51
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	52
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	55
	SEZNAM PŘÍLOH .....	57



## ÚVOD

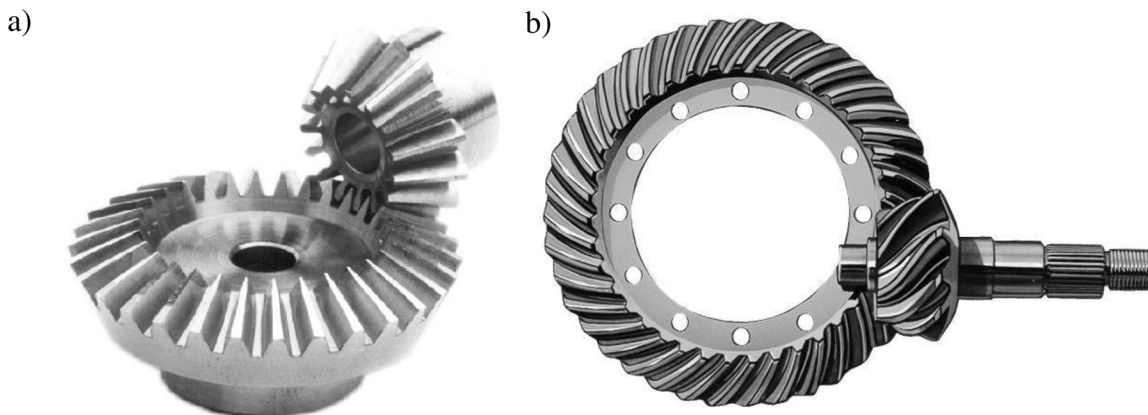
Mezi základní strojní mechanismy patří neodmyslitelně mechanické převody, které slouží k přenosu otáčivého pohybu a mechanické energie z hnacího členu na hnaný. Důvodů použití mechanických převodů je celá řada: požadované otáčky se neshodují s otáčkami hnacího stroje, je potřeba změnit smysl otáčení, změnit úhel mezi hřídeli hnacího a hnaného stroje či pohánět více hřídelů najednou. Může však dojít i ke změně druhu pohybu, např. z otáčivého na translační nebo naopak. Mechanické převody mohou být se silovým stykem (třecí, řemenové, lanové), nebo tvarovým stykem (řetězové, ozubené). Nejběžnějším typem jsou však právě převody ozubené, jejichž výhodou je velká účinnost i životnost, stálý převodový poměr a jednoduchá obsluha. Existuje několik základních typů ozubených převodů, z nichž nejpoužívanější jsou převody s čelními ozubenými koly a dále pak s kuželovými ozubenými koly.

Dvojice spoluzabírajících kuželových kol tvoří soukolí, u kterého dochází k přenosu energie pomocí do sebe zapadajících zubů, které se po sobě navzájem odvalují. Použití je zejména v konstrukci převodovek a automobilových diferenciálů.

Tato práce se zabývá základními typy kuželových ozubených kol z hlediska geometrie a výroby. Dále zahrnuje návrh plastového kuželového soukolí s přímým ozubením a jeho výrobu obrážením dvěma noži a technologií FDM (Fused Deposition Modeling), která spadá pod výrobní technologie Rapid Prototyping.

## 1 TEORIE OZUBENÍ KUŽELOVÝCH KOL

Kuželová ozubená kola jsou vhodná pro přenos otáčivého pohybu a mechanické energie mezi různoběžnými hřídeli – kuželová ozubená soukolí (obr. 1.1a), která mohou prakticky svírat téměř jakýkoliv úhel os  $\Sigma$ , nejčastěji se však používá  $\Sigma = 90^\circ$ . Dále se kuželová ozubená kola používají pro přenos energie mezi mimoběžnými hřídeli – hypoidní ozubená soukolí (obr. 1.1b) [1].



Obr. 1.1 Typy soukolí s kuželovými koly: a) kuželové ozubené soukolí, b) hypoidní ozubené soukolí [2, 3].

Ozubené kolo je složeno z těla a z ozubeného věnce, který má podle roztečné plochy tvar kuželu (dále roztečný kužel). Ozubený věnec je tvořen zuby, rovnoměrně rozmístěnými po celém obvodu kola, a je vymezen hlavovým a patním kuželem. Zuby se směrem k vrcholu roztečného kužele zužují, a proto jsou jako základ pro výrobu brány rozměry na vnějším doplňkovém kuželi (podkapitola 1.3) [4, 5].

Na obr. 1.2 a obr. 1.3 je vyobrazeno kuželové ozubené kolo spolu se základními geometrickými rozměry. Je nutno rozlišovat veličiny na vnitřním průměru kola ( $i$ ), na vnějším průměru kola ( $e$ ) a na středním průměru kola ( $m$ ). U některých veličin (modul, rozteč, tloušťka zubu, šířka zubové mezery) i hodnoty na normální rovině ( $n$ ) a hodnoty čelní ( $t$ ), které se měří na obvodu valivých kružnic [4, 5, 6, 7].

Základním parametrem každého ozubeného kola je modul, který vyjadřuje závislost mezi průměrem roztečné kružnice a počtem zubů podle vztahu (1.1). K určení převodového čísla u kuželového soukolí se vyjde ze vztahu (1.3) [7].

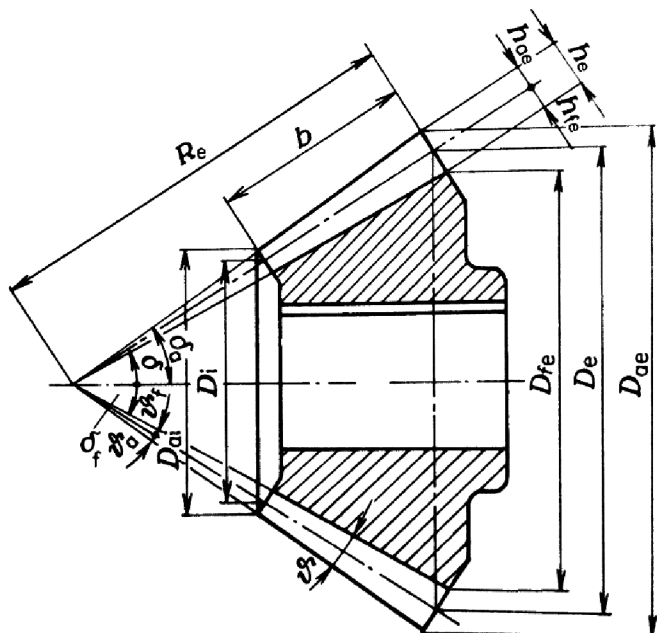
Základní vztahy [5]:

$$d = z \cdot m \text{ [mm]} \quad (1.1)$$

$$p = \frac{\pi \cdot d}{z} = \pi \cdot m \text{ [mm]} \quad (1.2)$$

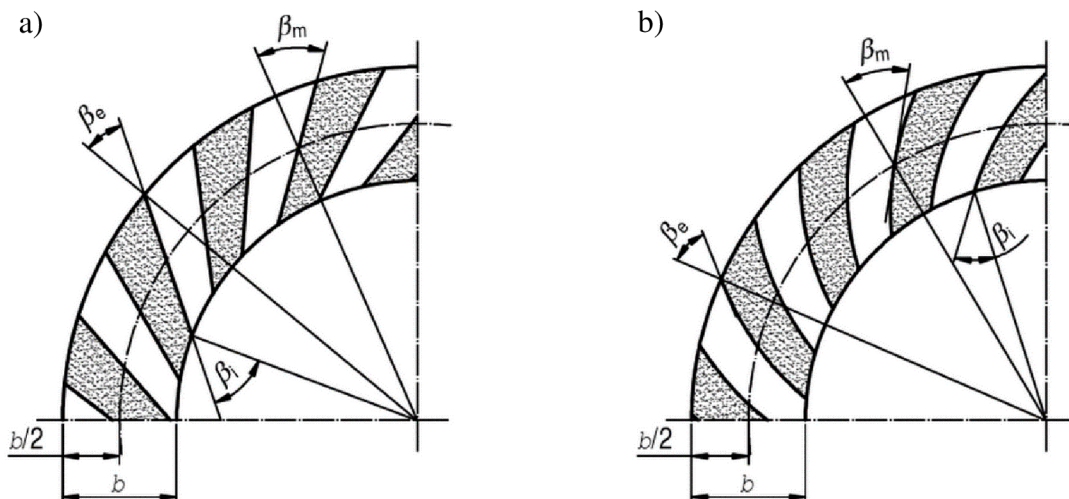
$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{\sin(\delta_2)}{\sin(\delta_1)} \text{ [-]} \quad (1.3)$$

- kde:  $d$  [mm] - průměr roztečné kružnice,  
 $z$  [-] - počet zubů (1 – hnacího kola, 2 – hnaného kola),  
 $m$  [mm] - modul,  
 $p$  [mm] - rozteč,  
 $u$  [-] - převodové číslo,  
 $\delta$  [-] - úhel roztečného kužele.



- $D_{ac}$  – vnější hlavový průměr  
 $D_{ai}$  – vnitřní hlavový průměr  
 $D_i$  – vnitřní střední průměr  
 $D_e$  – vnější střední průměr  
 $D_{fe}$  – vnější patní průměr  
 $R_e$  – vnější délka povrchy roztečného kužele  
 $b$  – šířka ozubení  
 $h_{ae}$  – vnější výška hlavy zuby  
 $h_e$  – vnější výška zuby  
 $h_{fe}$  – vnější výška paty zuby  
 $\delta$  – úhel roztečného kužele  
 $\delta_a$  – hlavový úhel roztečného kužele  
 $\delta_f$  – patní úhel roztečného kužele  
 $\vartheta$  – úhel zuby  
 $\vartheta_a$  – úhel hlavy zuby  
 $\vartheta_f$  – úhel paty zuby

Obr. 1.2 Základní pojmy u kuželových ozubených kol [4].



- $b$  – šířka ozubení,  $\beta_e$  – vnější úhel sklonu boční křivky,  $\beta_m$  – střední úhel sklonu boční křivky,  $\beta_i$  – vnitřní úhel sklonu boční křivky.

Obr. 1.3 Úhly sklonu bočních křivek: a) se šikmými zuby, b) se zakřivenými zuby [1].

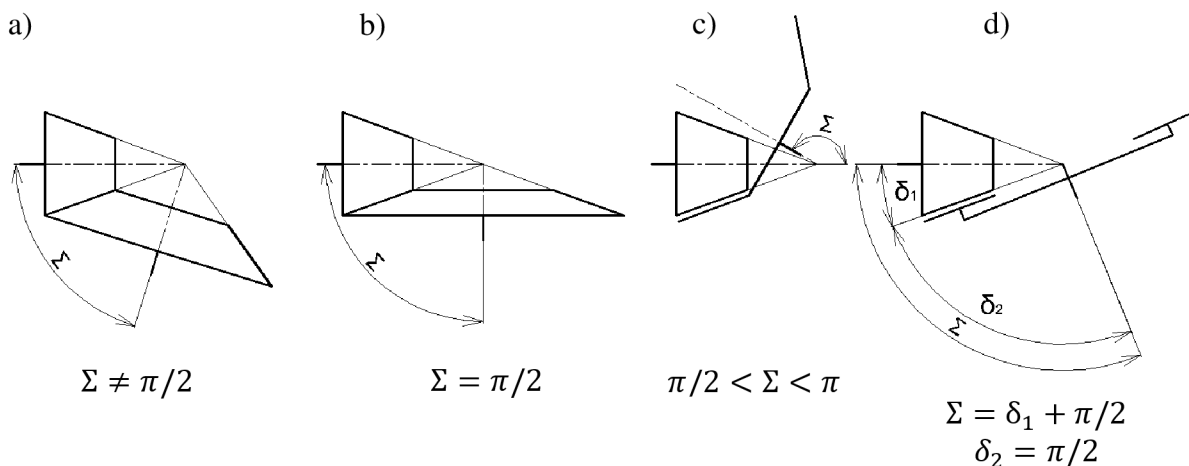
## 1.1 Základní dělení kuželových soukolí

Kuželová soukolí se rozdělují převážně podle vzájemné polohy os a podle druhu použitého ozubení.

### 1.1.1 Rozdělení podle vzájemné polohy os

Rozeznává se několik základních druhů soukolí s kuželovými koly (obr. 1.4) [6]:

- soukolí s vnějším ozubením (kosoúhlé a pravoúhlé),
- soukolí s vnitřním ozubením,
- soukolí základní s rovinným (základním) kolem.



Obr. 1.4 Rozdělení podle vzájemné polohy os: a) soukolí s vnějším ozubením - kosoúhlé, b) soukolí s vnějším ozubením - pravoúhlé, c) soukolí s vnitřním ozubením, d) soukolí základní s rovinným (základním) kolem [1, 4].

### 1.1.2 Rozdělení podle druhu ozubení

Podle průběhu boční křivky zubů mohou být kuželová kola [1]:

- s přímými zuby,
- se šikmými (tangenciálními) zuby,
- se zakřivenými zuby.

Podle druhu profilové křivky jsou kola s ozubením [4]:

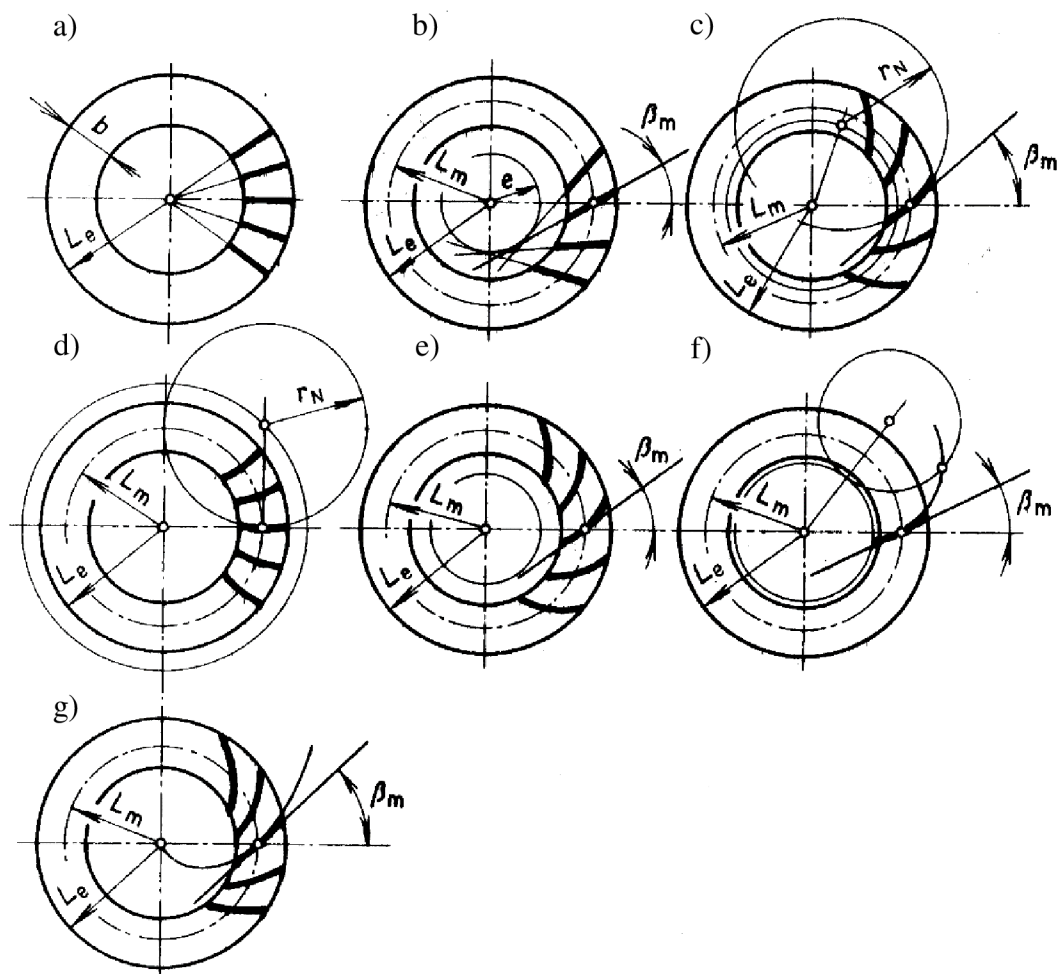
- evolventním,
- cykloidním.

Kuželová kola s přímými zuby jsou nejjednodušší typ. Jsou vhodná spíše pro nižší obvodové rychlosti a pro méně náročné převody. Mají široké využití v konstrukci automobilových diferenciálů [1, 5].

Kola se šikmými, zejména se zakřivenými zuby přináší, oproti kolům s přímými zuby, řadu výhod. Mají tišší chod, delší trvání záběru, větší životnost, schopnost přenášet větší výkony, menší citlivost na výrobní či montážní nepřesnosti a deformace, schopnost pracovat při vyšších rychlostech. Nevýhodou jsou ovšem drahé nástroje a stroje. Zvláštním druhem jsou kola se šípovými zuby, které slouží především k přenosu velkých výkonů při nízkých obvodových rychlostech, např. u vodních turbín (příloha 1) [1, 5, 6].

Podle smyslu zakřivení zubů se kola dělí na pravá a levá. Kuželové kolo je pravé, pokud se zuby při pohledu od vrcholu kužele stáčejí ve směru hodinových ručiček. Stáčí-li se zuby doleva, jedná se o kolo levé. Soukolí je pravé (levé) dle zakřivení zubů pastorku [4].

Druhy ozubení jsou znázorněny na obr. 1.5 a v tab. 1.1.



Obr. 1.5 Průběh zubů kuželových kol: a) s přímými zuby, b) se šikmými zuby, c) Gleason, d) Gleason-Zerol, e) paloidní ozubení Klingelnberg, f) eloidní ozubení Oerlikon-spiromatic, g) se spirálními zuby [4].

Tab. 1.1 Druhy ozubených kuželových kol [5, 9].

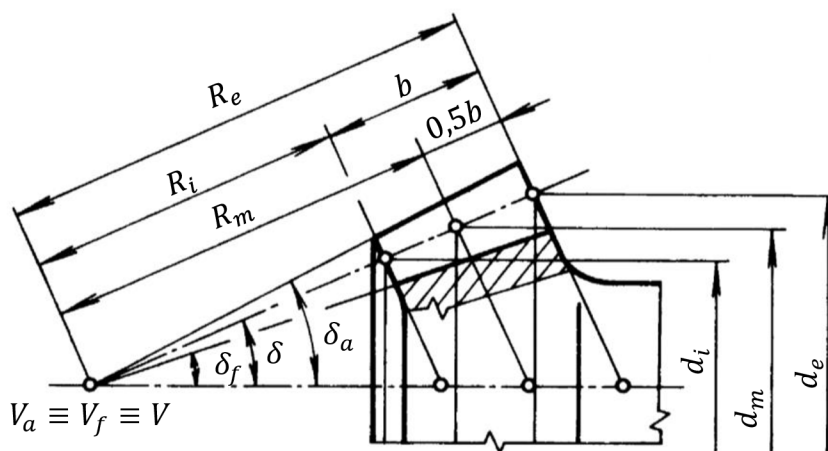
Boční křivka zubu	Druh soukolí	Výška zubu, tvar věnce	Normalizované veličiny
Radiální přímka	s přímými zuby	proměnlivá, tvar I.	$m_{et}$ – normalizovaný $\alpha_t = 20^\circ, 15^\circ, 14^\circ 30', 17^\circ 30'$ $\beta = \beta_m = 0^\circ$
Šikmá přímka	se šikmými zuby	proměnlivá, tvar I.	$m_{et}$ – normalizovaný $\alpha_t = 20^\circ, 15^\circ, 14^\circ 30', 17^\circ 30'$ $\beta_m = 20^\circ$ až $40^\circ$ (odstupňováno po $5^\circ$ )

Kruhový oblouk	Gleason (USA)	proměnlivá, tvar II.	$m_{mn}$ – normalizovaný $\alpha_{mn} = 20^\circ, 14^\circ 30', 17^\circ 30'$ $\beta_m = 30^\circ$ až $45^\circ$ (většinou $35^\circ$ )
	Gleason-Zerol (USA)	proměnlivá, tvar II.	$m_{mn}$ – normalizovaný $\alpha_{mn} = 20^\circ, 14^\circ 30', 17^\circ 30'$ $\beta_m = 0^\circ$
	Modul-Kurvex (Německo)	konstantní, tvar III.	$m_{mn}$ – normalizovaný $\alpha_{mn} = 20^\circ, 14^\circ 30', 17^\circ 30'$ $\beta_m = 25^\circ$ až $45^\circ$
Evolventa (paloida)	Paloidní ozubení Klingelnberg (Německo)	konstantní, tvar III.	$m_{mn}$ – normalizovaný $\alpha_{mn} = 20^\circ, 17^\circ 30'$ $\beta_m = 30^\circ$ až $38^\circ$
Epicykloida	Elloidní ozubení Oerlikon-spiromatic Švýcarsko	konstantní, tvar III.	$m_{mn}$ – normalizovaný $\alpha_{mn} = 17^\circ 30'$ $\beta_m = 30^\circ$ až $50^\circ$
	Cyklopaloidní ozubení Klingelnberg (Německo)	konstantní, tvar III.	$m_{mn}$ – normalizovaný $\alpha_{mn} = 20^\circ, 17^\circ 30'$ $\beta_m = 0^\circ$ až $45^\circ$

## 1.2 Druhy ozubených věnců

„Ozubený věnec kol je radiálně vymezen patním a hlavovým kuželem“ [4]. Plochy těchto kuželů jsou definovány pomocí polovičních vrcholových úhlů kuželů patních  $\delta_{f1}$ ,  $\delta_{f2}$  a hlavových  $\delta_{a1}$ ,  $\delta_{a2}$ . Dle polohy těchto patních a hlavových kuželů vůči roztečnému kuželi jsou rozeznávány tři typy věnců [4]:

1. U tvaru I (obr. 1.6) je vrchol patního, roztečného a hlavového kužele společný. Se vzdáleností od vrcholu kužele se rozměry zubů v příčném řezu lineárně zvětšují.

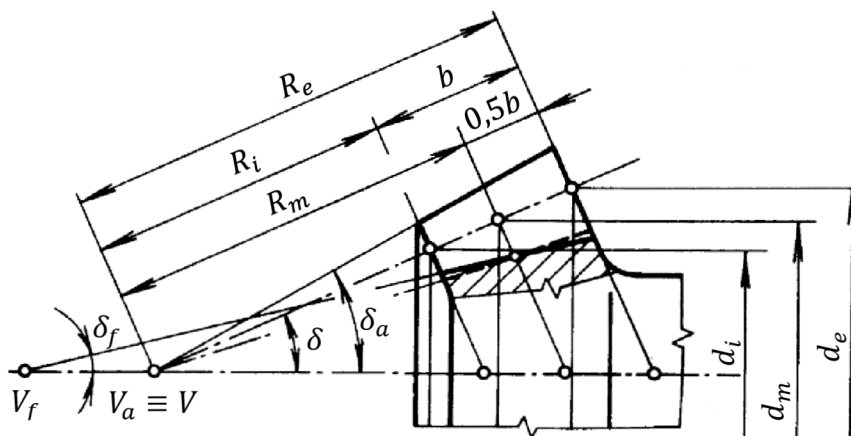


Obr. 1.6 Tvar I [4].

Legenda k obr. 1.6 až obr. 1.8:

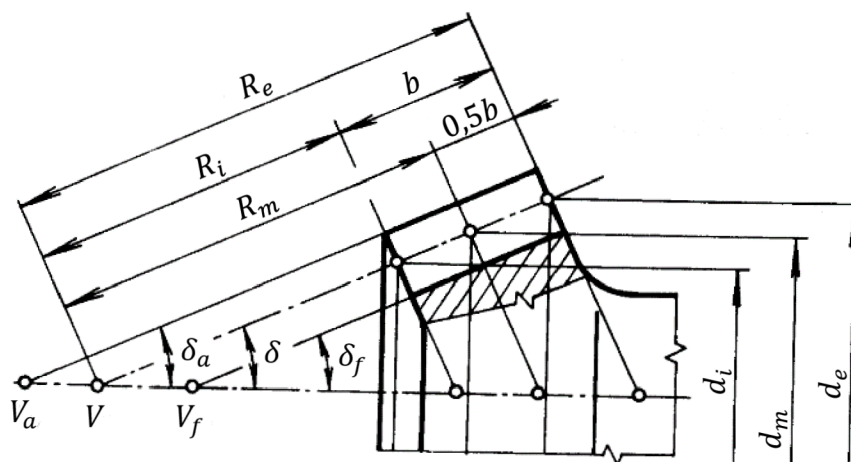
$R_e$  – vnější délka površky roztečného kužele,  $R_i$  – vnitřní délka površky roztečného kužele,  $R_m$  – střední délka površky roztečného kužele,  $b$  – šířka ozubení,  $\delta$  – úhel roztečného kužele,  $\delta_f$  – úhel patního kužele,  $\delta_a$  – úhel hlavového kužele,  $d_i$  – vnitřní roztečný průměr,  $d_m$  – střední roztečný průměr,  $d_e$  – vnější roztečný průměr,  $V$  – vrchol roztečného kužele,  $V_f$  – vrchol patního kužele,  $V_a$  – vrchol hlavového kužele.

2. Pro tvar II (obr. 1.7) je vrchol roztečného a hlavového kužele společný, avšak vrchol patního kužele je posunut tak, aby byla šířka dna zubové mezery konstantní. Tloušťka zubu na roztečném kuželi úměrně narůstá se vzdáleností od vrcholu kužele.



Obr. 1.7 Tvar II [4].

3. Tvar III (obr. 1.8) má konstantní výšku zubů. Površky hlavového, roztečného a patního kužele jsou v osové řezu rovnoběžné, tj.  $\delta_a = \delta_f = \delta$ .



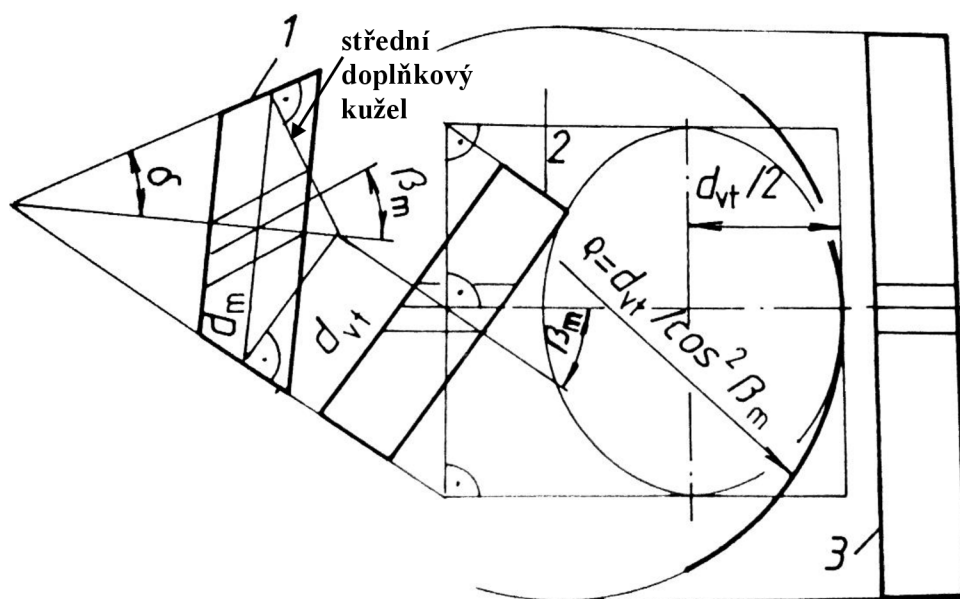
Obr. 1.8 Tvar III [4].

### 1.3 Porovnávací (virtuální a bivirtuální) kola

Virtuální kolo je pomyslné evolventní čelní kolo s přímým ozubením, které má profil zubů prakticky totožný jako normální profil zubů kuželového kola s přímým ozubením, většinou ve středním příčném řezu. Získá se rozvinem pláště doplňkového kužele do roviny a vzniklá výseč se doplní [4].

V případě ozubených soukolí se šikmými nebo zakřivenými zuby se rozvine střední doplňkový kužel, kterému se doplní vzniklá výseč. Kolo je nutné rozšířit na šířku  $b$ . Vznikne tak virtuální kolo se šikmými zuby, které je nutné dále převést (obr. 1.9). Takto vzniklé čelní ozubené kolo s přímými zuby se nazývá kolo bivirtuální [4].

Tato porovnávací kola jsou vhodná pro analýzu geometrie a při kontrole únosnosti [5].



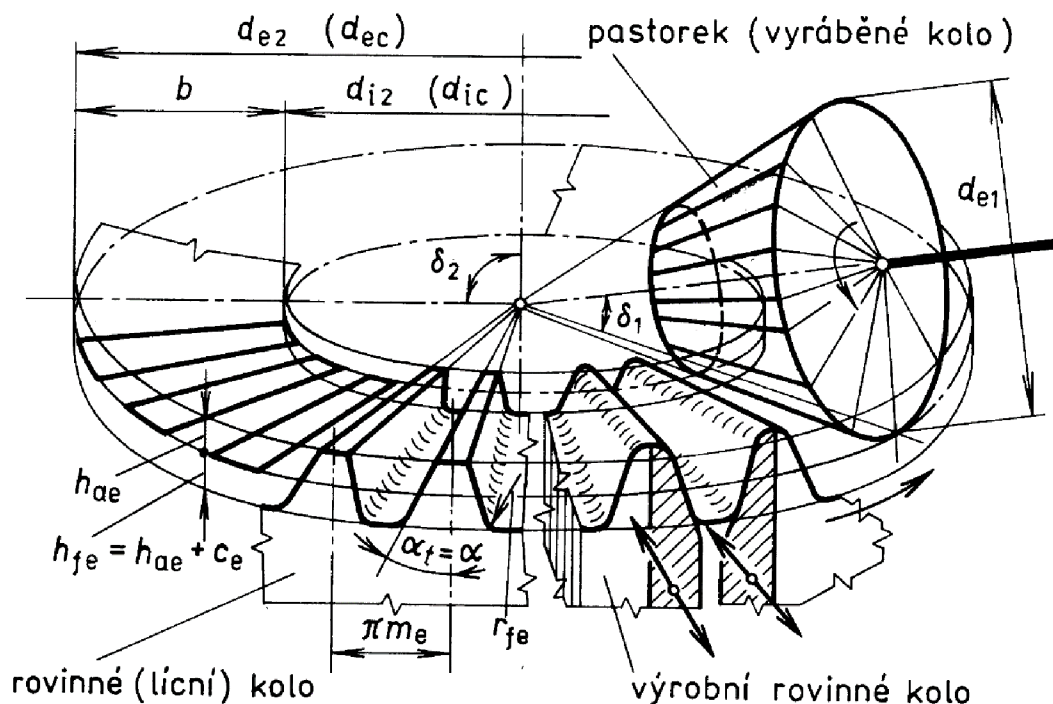
Obr. 1.9 Virtuální čelní kolo se šikmými zuby (2) a náhradní (bivirtuální) čelní kolo s přímými zuby (3) kuželového ozubeného kola se šikmými zuby (1) [8].

### 1.4 Rovinné kolo

Rovinné kolo je reálné kolo s úhlem roztečného kužele  $\delta_2 = 90^\circ$ . Boční evolventní profily boků zubů přecházejí v přímky a profil ozubení na vnější čelní ploše připomíná základní profil rovinného ozubeného hřebene [4].

Výrobní rovinné kuželové kolo je pomyslné a jeho zuby, doplněné hlavovou nástavbou, jsou tvořeny tak, aby při záběru s vyráběným kolem došlo k obalení boční a patní plochy. Prakticky však stačí realizovat nejvýše dvě boční plochy jedné zubové mezery a to dvojicí tvarových nožů. Není proto nutné, aby počet zubů výrobního rovinného kola byl celé číslo. Jedno výrobní rovinné kolo je určeno pouze pro jedno kuželové soukolí a slouží k určení tvaru, nastavení a pohybu nožů [4].



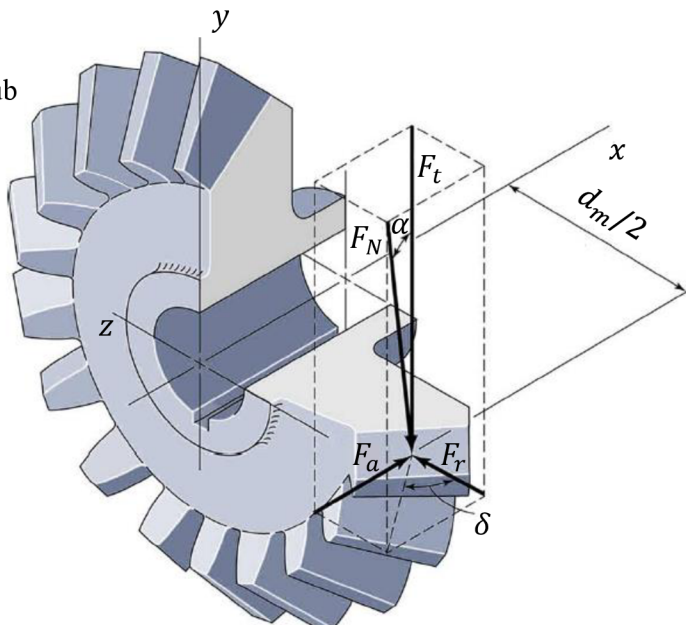


Obr. 1.10 Rovinné kolo a výrobní rovinné kolo [4].

### 1.5 Silové poměry

U zatíženého soukolí vznikají v místě dotyku sledovaného kola dvě funkční veličiny a to točivý moment  $M_t$ , který bývá většinou známý, a osamělá síla  $F_N$ . Působíště této síly se klade do středního příčného řezu na povrchu roztečného kužele. Takto umístěnou sílu je však nutno rozložit do tří složek: složky tečné  $F_t$ , složky radiální  $F_r$  a složky axiální  $F_a$ . Tento rozklad je potřebný pro výpočet vazbových reakcí v ložiskách na hřídeli kuželového ozubeného kola. Síly u hnacího a hnaného kola jsou díky principu akce a reakce stejně velké, avšak opačně orientované. Silové poměry se zpravidla řeší u pastorku. Na obr. 1.11 jsou silové poměry znázorněny. U vztahů (1.4) až (1.13) je hnací kolo značeno indexem 1 a hnané kolo indexem 2 [4].

- $F_N$  – síla působící na zub
- $F_t$  – obvodová síla
- $F_a$  – axiální síla
- $F_r$  – radiální síla
- $d_m$  – střední roztečný průměr



Obr. 1.11 Silové poměry u kuželového kola s přímými zuby [7].

Pro kuželový pastorek s přímými zuby platí [4]:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_{t1}}{d_{m1}} [N] \quad (1.4)$$

$$F_{r1} = F_t \cdot \operatorname{tg}(\alpha_t) \cdot \cos(\delta_1) [N] \quad (1.5)$$

$$F_{a1} = F_t \cdot \operatorname{tg}(\alpha_t) \cdot \sin(\delta_1) [N] \quad (1.6)$$

$$F_N = \frac{F_t}{\cos(\alpha_t)} [N] \quad (1.7)$$

kde:  $F_t$  [N] - tečná složka síly  $F$ ,  
 $M_{t1}$  [Nmm] - přiváděný točivý moment,  
 $d_{m1}$  [mm] - střední roztečný průměr,  
 $F_{r1}$  [N] - radiální složka síly  $F$ ,  
 $\alpha_t$  [-] - úhel záběru čelní,  
 $\delta_1$  [-] - úhel roztečného kužele,  
 $F_{a1}$  [N] - axiální složka síly  $F$ ,  
 $F_N$  [N] - normálová síla.

Pro kuželový pastorek s nepřímými zuby platí [4]:

$$F_t = \frac{2 \cdot M_{t1}}{d_{m1}} [N] \quad (1.8)$$

$$F_{r1} = \frac{F_t}{\cos(\beta_m)} \cdot [\operatorname{tg}(\alpha_{mn}) \cdot \cos(\delta_1) \pm \sin(\beta_m) \cdot \sin(\delta_1)] [N] \quad (1.9)$$

$$F_{a1} = \frac{F_t}{\cos(\beta_m)} \cdot [\operatorname{tg}(\alpha_{mn}) \cdot \sin(\delta_1) \pm \sin(\beta_m) \cdot \cos(\delta_1)] [N] \quad (1.10)$$

$$F_N = \frac{F_t}{\cos(\alpha_{mn}) \cdot \cos(\beta_m)} [N] \quad (1.11)$$

kde:  $\beta_m$  [-] - střední úhel sklonu boční křivky zubu,  
 $\alpha_{mn}$  [-] - úhel záběru střední normálný,  
 $\delta_1$  [-] - úhel roztečného kužele.

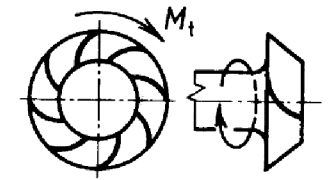
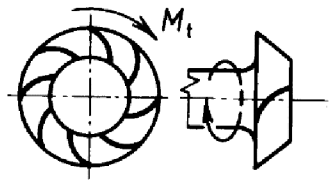
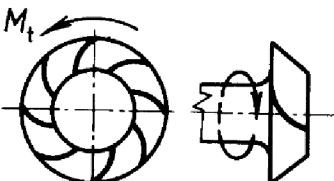
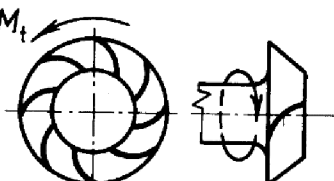
Pro  $\Sigma = 90^\circ$  platí:

$$F_{a2} = F_{r1} [N], \quad (1.12)$$

$$F_{r2} = F_{a1} [N], \quad (1.13)$$

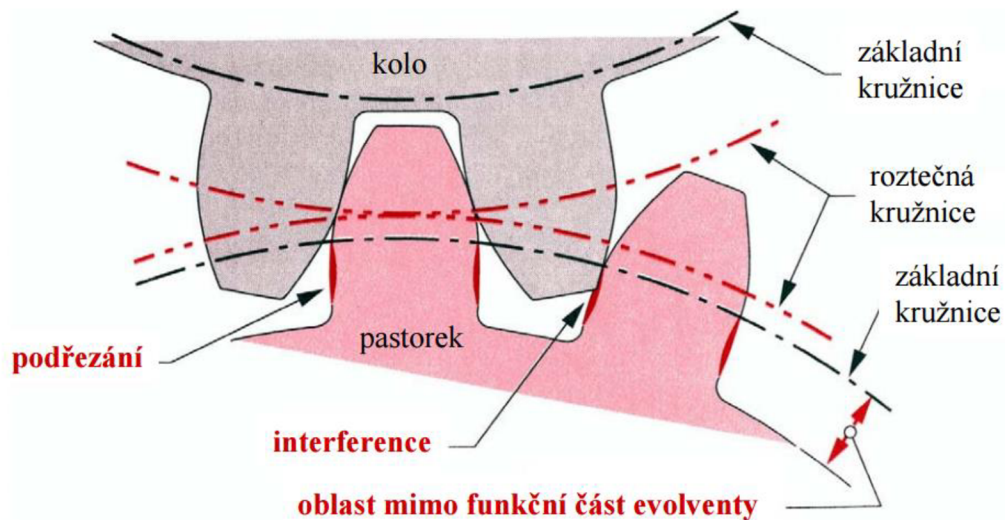
U přímého ozubení jsou pastorek i kolo, působením sil  $F_r$  a  $F_a$ , ze záběru vždy vytlačovány, zatímco u soukolí s nepřímým ozuběním mohou být i vtahovány. Závisí totiž na momentu  $M_t$  a na směru zakřivení zubů [4]. V tab. 1.2 jsou patrné znaménka pro vztahy (1.9) a (1.10).

Tab. 1.2 Závislost momentu a zakřivení zubů na axiální a radiální síle [4].

Směr stoupání zubů		Vztah pro	
Pravý	Levý	$F_r$	$F_a$
		-	+
		+	-

### 1.6 Interference a korekce

Interferencí se označuje jev, u kterého dochází ke kolizi částí boků zubů spoluzabírajících kol (obr. 1.12). Nastane tehdy, jestliže je záběr hlavy zubu v patě zubu protikola mimo funkční část evolventy. Následkem je podřezání plochy boku zubu, které je příčinou zeslabení jeho paty. K tomuto podřezávání dochází i při výrobě, kde nástroj kvůli zaoblení zubu podřezává patu kola. Takto zeslabená pata kola má však nepříznivý vliv při namáhání na ohyb. K interferenci dochází především v případě malého počtu zubů [5, 7].



Obr. 1.12 Interference a podřezání paty zubu [7].

Interferenci lze zabránit zvýšením počtu zubů. Dále pak snížením hlavy kola nebo zvětšením úhlu záběru, avšak tyto modifikace vyžadují nenormalizované nástroje, které jsou velmi nákladné. Proto se používá spíše korekce profilu posunutím [5].

Korekce profilu zubů odstraňuje nedostatky běžného ozubení. Vzniká díky radiálnímu (výškovému) a tangenciálnímu (obvodovému) posunutí nožů při výrobě. Radiální posunutí je určeno součinitelem  $x$  a tangenciálním součinitelem  $x_\tau$ , avšak obvykle se obě posunutí

kombinují. Kola s kladným posunutím jsou značena jako + V, kola se záporným jako - V a kola nekorigovaná jako N. Sdružením kol N, + V a - V vznikne soukolí N ( $x = x_{\tau} = 0$ ), soukolí VN ( $x = x_1 = -x_2$  a  $x_{\tau} = x_{\tau 1} = -x_{\tau 2}$ ) nebo soukolí V, které se ale u kuželových ozubených kol nepoužívá, protože vede k úchytkám v záběru [4, 9].

Korigovaná kola přinášejí následující výhody [4, 6]:

- zabraňují podříznutí zubů (pouze kladná korekce),
- zabránění špičatosti zubů (pouze záporná korekce),
- vylepšení pevnostních a záběrových vlastností.

### 1.7 Poškození zubů

#### a) Lom zubu

Jedná se o nejnebezpečnější druh poškození, který může vést, díky zaklínění úlomků, k vážné poruše hřídelů, ložisek i skříně. Lomy se rozlišují na křehké a únavové. Lom křehký vzniká většinou jako důsledek náhlého přetížení (např. rázu), zatímco lom únavový je výsledkem dlouhodobého únavového poškození, vycházejícího zpravidla z mikroskopických defektů. U kol s přímými zuby dochází většinou k vylomení celého zubu, zatímco u kol se šikmými zuby bývá častější odlomení jeho okrajové části [4].

#### b) Únavové vydrolování pracovních povrchů (pitting)

Vzniká u ozubených kol, která pracují v uzavřených převodech s dostatkem maziva. Vysoká, cyklicky se opakující dotyková napětí vedou na bocích zubů k vytvoření sítě jemných trhlin. Pitting vzniká převážně na patě zubu, kde se při záběru dostane do kontaktu nejdříve hrdlo trhliny, které se uzavře. Při postupu se tlakové působení přenáší na olej uzavřený v trhlíně, který působí jako hydraulický klín. Tato trhlina se rozšiřuje do doby, než dojde k vydrolení povrchu a vytvoření jamky [4, 7].

Dělí se na záběhové (počáteční) a na progresivní (destruktivní). Záběhové vydrolování vzniká zpočátku provozu soukolí v důsledku překročení kontaktního tlaku vinou nepřesné výroby a montáže. Vznik prvních jamek napomáhá k vyrovnání tlaku podél zubu. Jakmile se povrch přizpůsobí, vydrolování zcela ustává. Z provozního hlediska je záběhové vydrolování prakticky neškodné [4, 7].

Progresivní vydrolování se šíří neustále a zachvacuje celý povrch paty zubu. Při vzniku prvních jamek se zmenší nosná plocha a tím se zvýší tlak, který vede k tvorbě nových jamek a rozšíření těch stávajících. Progresivní vydrolování bývá nejčastější příčinou vyřazení kol z provozu, avšak dá se mu předcházet výpočtem ozubení na dotykovou pevnost nebo mechanickými úpravami paty zubu – např. přetvoření kuličkováním [4, 7].

#### c) Opotřebení otěrem – abraze

Projevuje se převážně u otevřených převodů, které mají volný přístup k abrazivním částicím, které při odvalování způsobují vrypy. Může však být i u převodů uzavřených, které pracují v prašném prostředí (lomy, doly, stavebnictví). Abrazivní účinky však lze eliminovat použitím dostatku maziva vhodných vlastností a jeho pravidelnou výměnou, použitím filtrace, zajištěním kvalitního povrchu a vysoké tvrdosti boků zubů [4, 7].

#### d) Zadírání pracovních povrchů (scuffing)

Vzniká v místě narušení mazacího olejového filmu. To může nastat působením vysokého tlaku nebo teploty v místě dotyku. Dochází pak k vytváření velmi pevných atomárních vazeb mezi povrchovými zrny spoluzabírajících boků zubů. Zrna takto za studena přivařena se z povrchu zubu o menší kohezi odtrhávají a na povrchu protiboku vznikají nárůstky. Dochází k tvorbě hlubokých rýh a poškození povrchu obou zubů. Lze

tomu však předcházet zvýšením kvality povrchu, použitím maziv s vysokou viskozitou a jeho chlazením [4, 7].

e) Otláčování povrchů (ridging)

Je typické pro silně zatížené převody s nízkou obvodovou rychlostí s koly z měkkého tvárného materiálu. Velké zatížení a malá skluzová rychlost mají za následek vznik velkých třecích sil, díky kterým dochází k plastické deformaci boku zubu. Projevuje se vznikem sérií vrcholů a údolí, které se objevují napříč bokem zubu ve směru kluzné rychlosti. Tomuto poškození lze zabránit zvýšením tvrdosti boků zubů, snížením kontaktního tlaku, někdy stačí použít méně viskózní mazivo [4, 7].

### 1.8 Materiály kuželových ozubených kol

Kuželová ozubená kola se vyrábějí nejčastěji z oceli, ale používá se i litina a neželezné materiály jako bronz, mosaz, plasty a kompozity. V tab. 1.3 je výběr základních materiálů pro ozubená kola [4].

Tab. 1.3 Materiály kuželových ozubených kol [4, 9, 10, 11].

Materiál	Materiálová skupina	Označení podle ČSN	Označení dle EN
Ocel	konstrukční uhlíková	11 523	S355J0
		11 600	E335
	konstrukční ušlechtilá uhlíková	12 050	C45E
		12 060	C55E
	legovaná	14 220	16MnCr5
		16 220	15CrNi6
		16 420	15NiCr13
	nerezová	17 240	X5CrNi18-10
	na odlitky nelegovaná	42 2650	GE 240
		42 2660	GE 300
	na odlitky legovaná	42 2719	-
		42 2750	-
Litina	s lupínkovým grafitem (šedá)	42 2425	GJL-250
		42 2430	GJL-300
	s kuličkovým grafitem (tvárná)	42 2306	GJS-600-3
		42 2307	GJS-700-2
		42 2308	GJS-800-2
Mosaz	-	42 3223	CuZn40Pb2
Bronz	cínový	42 3018	CuSn8
		42 3123	CuSn12
	hliníkový	42 3046	CuAl10Fe3Mn2
		42 3047	CuAl10Ni5Fe4
Plasty a kompozity	polyamid	MaPA	MaPA
		PA6	PA6
	ertacetal	POM-H	POM-H
	textit	PFCC 201	PFCC 201

## 1.9 Měření kuželových ozubených kol

Na každé kuželové ozubené kolo jsou kladeny určité požadavky, které je nutno dodržet, a které se odvíjejí od podmínek a účelu použití. Ke správnému záběru a přenosu krouticího momentu dojde pouze v případě, jsou-li splněny následující podmínky [12]:

- přesný a správný tvar zubů a kvalita jejich povrchu,
- radiální a axiální házení musí být minimální,
- vrchol roztečného kužele musí ležet na ose vrtání náboje.

Pro měření jednotlivých parametrů kuželových ozubených kol existuje celá řada přístrojů, které se liší svým určením. Používají se na měření [13]:

- kinematické odchylky,
- rozteče,
- házení,
- jmenovitého úhlu os,
- jednobokého nebo dvoubokého odvalu,
- profilu zubu (evolventoměr),
- sklonu zubu (sklonoměr),
- tloušťky zubů (zuboměr),
- pásma dotyků zubů,
- úchylky odvalu.

Přesnost kuželových ozubených kol je také dána ukazateli, jako je hluk, struktura povrchu a vibrace [12].

### 1.9.1 Měření zubu v konstantní výšce

Kontroluje se tloušťka zubu pomocí zuboměru (obr. 1.13). Zuboměr je tvořen dvěma posuvnými měřítka, která jsou navzájem kolmá. Před samotným měřením je nutno spočítat výšku zubu  $h_{ce}$  a jmenovitou hodnotu tloušťky zubu  $s_{ce}$ , včetně tolerance. Na svislém měřítka se nastaví výška zubu  $h_{ce}$  a zuboměr se nasune na vnější průměr kuželového ozubeného kola. Pomocí podélného měřítka se změří tloušťka zubu a jeho hodnota se porovná s vypočtenou hodnotou  $s_{ce}$  [12].



Obr. 1.13 Digitální zuboměr.

### 1.9.2 Měření dvoubokého odvalu za otáčku a za rozteč

Spoluzabírající kola jsou upnuta v protáčecím přístroji (obr. 1.14) a přitlačována pružinou, která zajistí záběr bez boční vůle. Vyhodnocení probíhá pomocí číselníkového úchylkoměru, který během ručního otáčení hodnoceného soukolí ukazuje kinematickou úchylku. Kontrolují se kinematické úchylny za rozteč  $f_i''$  a za otáčku  $F_i''$ , které se následně zakreslí do diagramu a vyhodnotí. V záběru mohou být použita buď dvě vyráběná kola anebo kolo vyráběné s kolem kontrolním [12].

Jedná se o rychlou komplexní kontrolu, při které je možné odhalit, zda došlo při výrobě k nepřesnostem vlivem opotřebení nástroje, nesprávně upnutému obrobku či nesprávnému chodu nástroje [12].



Obr. 1.14 Protáčecí přístroj.

V současné době se pro kontrolu ozubení používají i měřicí centra pro ozubení (např. Klingelnberg P65) nebo souřadnicové měřicí stroje (např. PRISMO navigator od firmy ZEISS se softwarovým modulem Gear Pro). Kontrola struktury povrchu na boku zubů může být provedena pomocí kontaktních nebo bezkontaktních měřících zařízení a strojů (např. Alicona InfiniteFocus). V příloze 2 jsou výše uvedené stroje zobrazeny [14, 15, 16].

## 2 VÝROBA OZUBENÍ KUŽELOVÝCH KOL

Ozubená kola lze obecně vyrábět obráběním, odléváním, slinováním (práškovou metalurgií), tvářením (za tepla nebo za studena), vstřikováním (ozubená kola z termoplastů) a využitím metod Rapid Prototyping. Obrábění je však nejrozšířenější způsob výroby [5].

### 2.1 Obrábění kuželových kol s přímými a se šikmými zuby

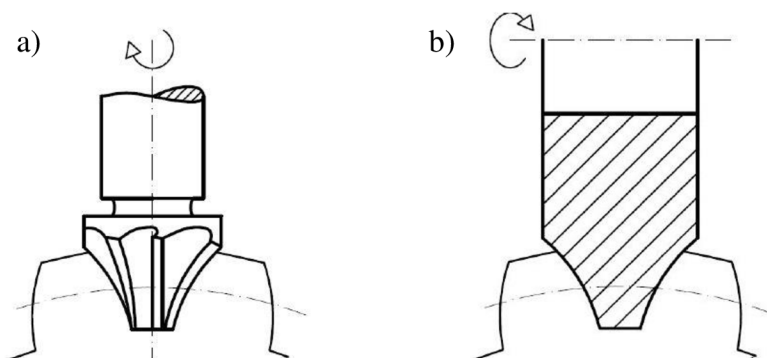
Kuželová kola s přímým (obr. 2.1) a šikmým ozubením lze obrábět frézováním, obrážením nebo protahováním.



Obr. 2.1 Kuželová kola s přímými zuby.

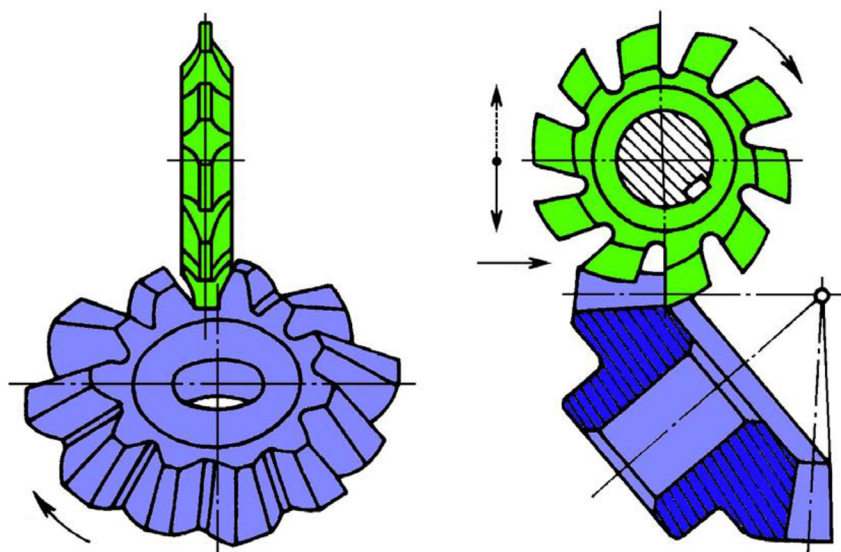
#### 2.1.1 Frézování tvarovou frézou

Výroba ozubení probíhá na univerzálních frézkách dělicím způsobem. Nástroj je tvarová fréza, která může být čepová (obr. 2.2a) nebo kotoučová (obr. 2.2b, obr. 2.3). Zubovou mezeru, která nemá konstantní šířku, nelze frézovat najednou, ale v několika krocích. Nejdříve se frézuje střední část zubové mezery, poté se obrobek pootočí a frézuje se jeden bok zubu. Následně dojde k dalšímu pootočení obrobku a frézuje se druhý bok zubu. Po obrobení jedné zubové mezery se obrobek pootočí o jednu zubovou rozteč a postup se opakuje. Nelze však vyrobit teoreticky správné kuželové ozubení, neboť modul se směrem k vrcholu kužele obráběného kola lineárně zmenšuje. Výroba tímto způsobem se používá u kol s menší přesností a k hrubování kol před dokončením odvalovacím způsobem. Čepovou frézou lze vyrábět i ozubení se šířovými a zakřivenými zuby (obráběné kolo se musí natáčet kolem vlastní osy) [17, 18].



Obr. 2.2 Modulové frézy: a) čepová, b) kotoučová [19].

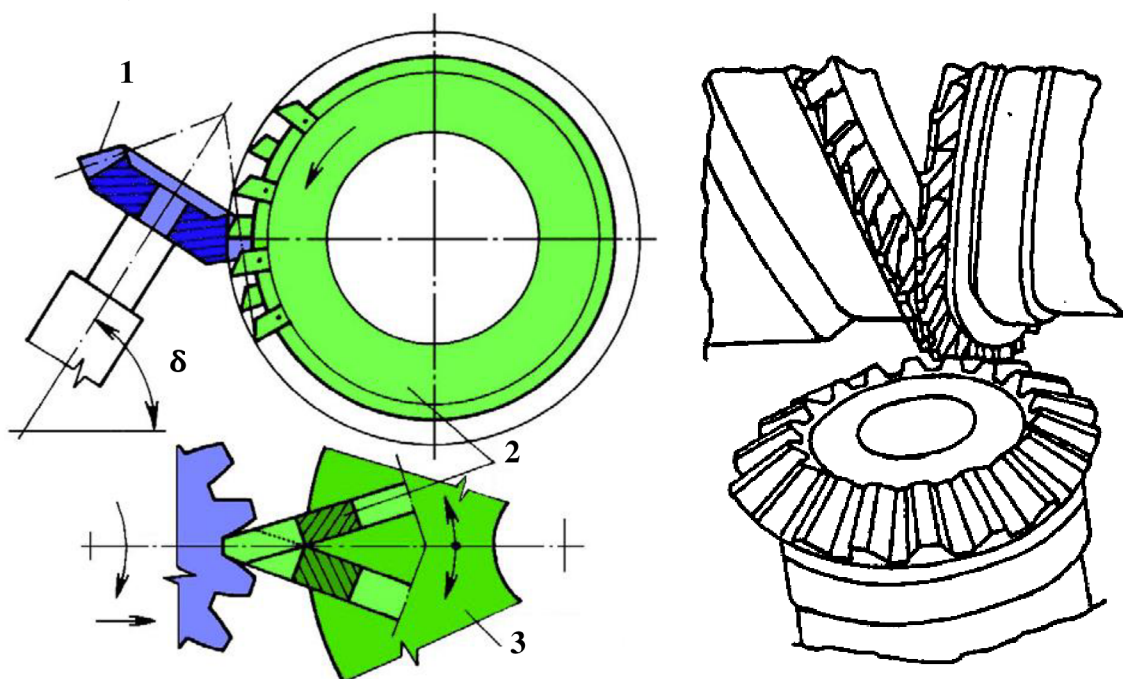




Obr. 2.3 Frézování kuželových kol s přímým ozubením tvarovou kotoučovou frézou [18].

### 2.1.2 Frézování nožovými hlavami

Nástrojem jsou dvě kotoučové nožové hlavy (pravá a levá), ve kterých jsou po obvodu vsazeny nože. Tyto nože se během obrábění v zubové mezeře překrývají. Vnější břity obou hlav mají v momentě překrytí tvar zubu základního rovinného kola. Zubová mezera se frézuje dělicím způsobem a je tvořena odvalováním a zapichováním. Odvalování je zajištěno kolébkou (obr. 2.4) a k zapichování dochází při radiálním posuvu na hloubku zubu obráběného kola. Takto vyrobené zuby mají soudečkovitý tvar, pata a dno zubu mají tvar kruhového oblouku. Používá se při výrobě kol malých a středních rozměrů (modul 0,3 až 10 mm) [17, 18].

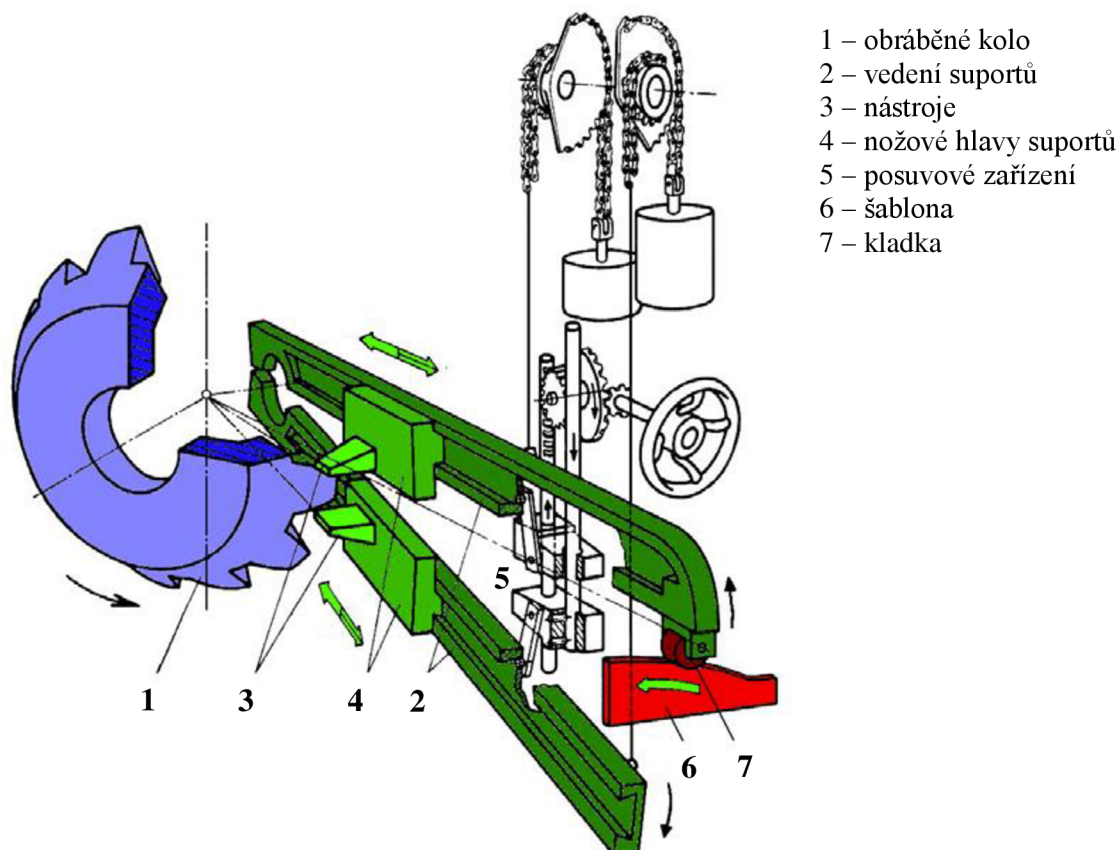


1 – obráběné kolo, 2 – kotoučové frézy, 3 – kolébka.

Obr. 2.4 Frézování ozubení nožovými hlavami [18, 20].

### 2.1.3 Obrázení podle šablony

Obrázení probíhá dvěma noži, upevněnými v nožových hlavách suportů (obr. 2.5). Tyto nožové hlavy se pohybují ve vedeních suportů a konají přímočarý vratný pohyb. Na konci vedení suportů je kopírovací kladka, která se pohybuje po šabloně a určuje tak polohu obrázcích nožů. „Tvar šablony se určuje podle tvaru zubu na doplňkovém kuželu a pro stejný počet zubů kuželových kol s různými moduly stačí jedna šablona“ [17]. Obrábění probíhá pouze špičkami nástrojů, a proto se dosahuje nízké jakosti povrchu. Mezi výhody této metody patří výroba přesných kuželových kol, kde se modul směrem k vrcholu kužele obráběného kola zmenšuje [17, 18].

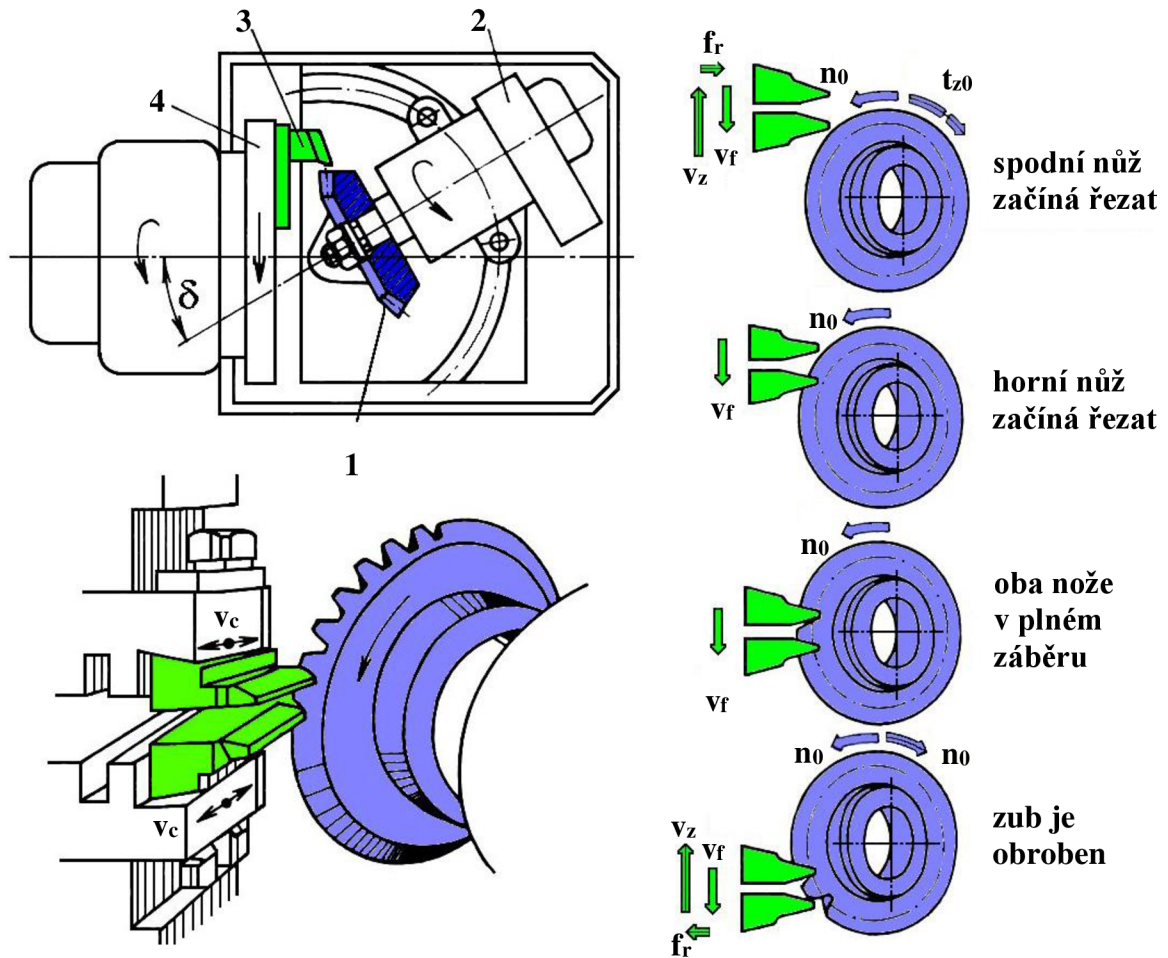


Obr. 2.5 Obrázení ozubení kuželových kol podle šablony [18].

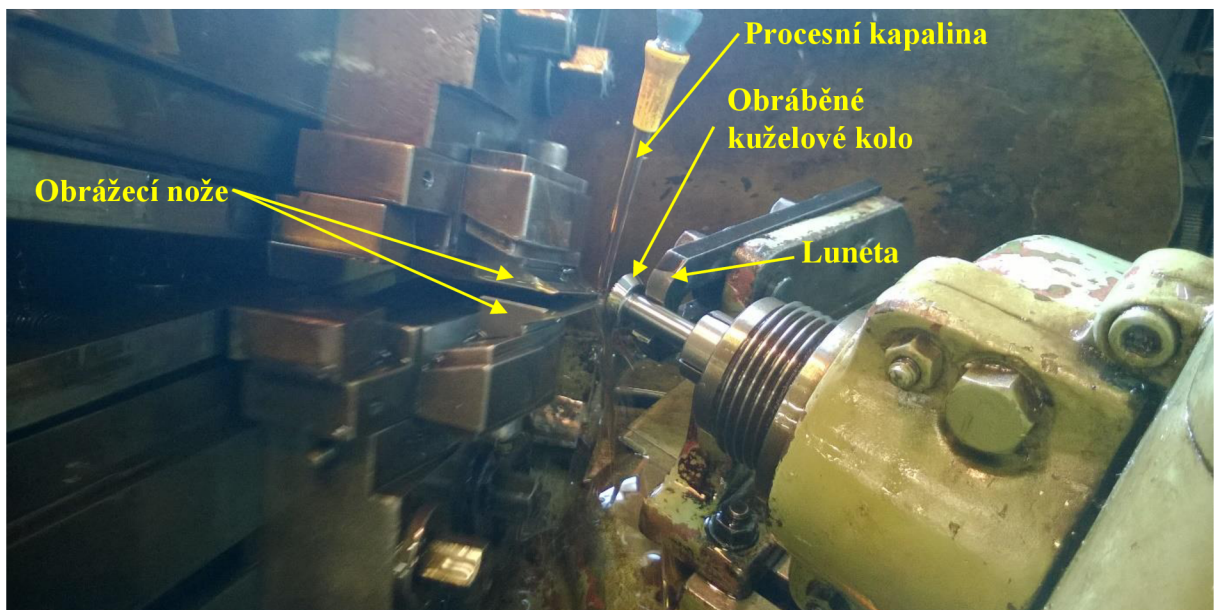
### 2.1.4 Obrázení dvěma noži

Jedná se o způsob výroby, kdy při obrázení dvěma noži dochází k odvalu boku zubu. Nože, jejichž profil je lichoběžníkový, jsou upnuté v otočné hlavě a konají řezný pohyb ve směru povrchových přímk boků zubů. Břity obrázcích nožů vytvářejí evolventní profil tak, že se současně natáčí nožová hlava a obráběné kolo. Každý nůž vyrábí jeden bok zubu a po obrobení se obráběné kolo i nožová hlava vrátí do původní polohy a na dělicím zařízení se obrobek pootočí o jednu zubovou rozteč. Následně se proces opakuje. Takto se hrubují nebo dokončují kuželová ozubená kola do modulu  $m = 20$  mm a průměru 1200 mm. Jsou typy strojů, na kterých je možné vyrábět i šikmé ozubení [17, 18].

Obrázení dvěma noži je znázorněno na obr. 2.6 a obr. 2.7.



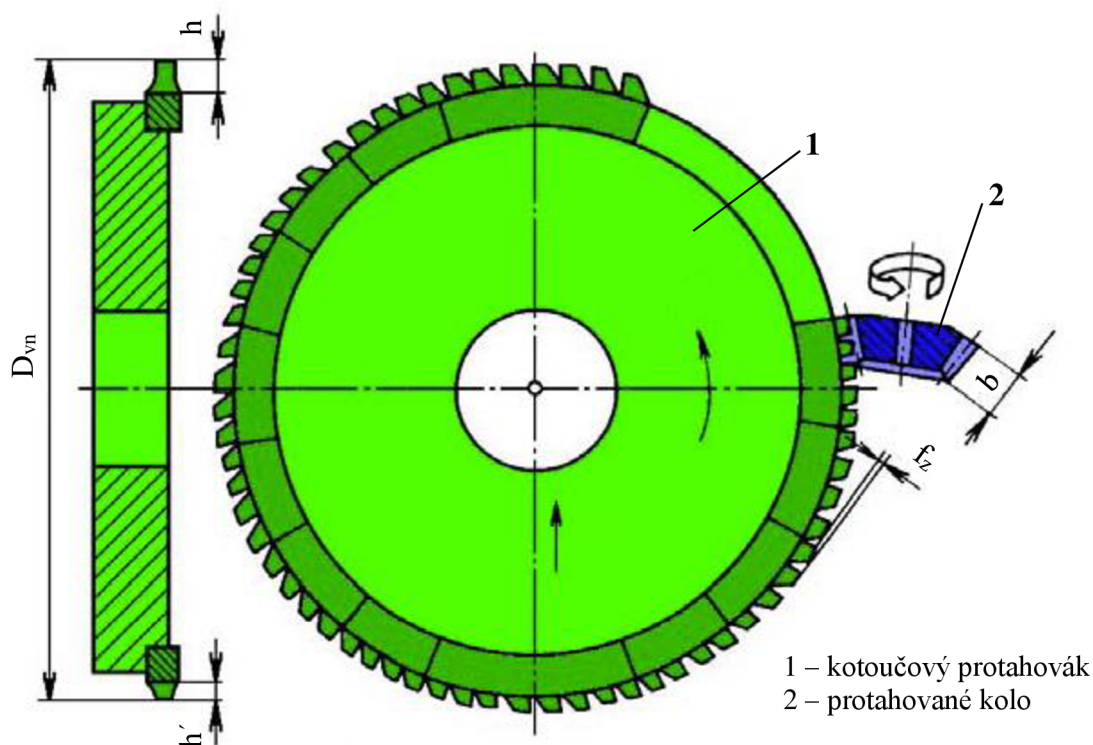
Obr. 2.6 Obrážení ozubení kuželových kol dvěma noži [18].



Obr. 2.7 Obrážení ozubení kuželového kola.

### 2.1.5 Protahování

Výroba ozubení probíhá dělicím způsobem, kde nástroj je kotoučový protahovák (obr. 2.8) o průměru 450 až 600 mm. Na obvodu jsou mechanicky upevněny segmenty s břity, které jsou odstupňované a mají tvar zubové mezery. Evolventní profil boků zubů je ale nahrazen kruhovými oblouky s poloměrem křivosti evolventy. Protahovák koná rotační pohyb a zároveň se posouvá podél zubu od menšího profilu k většímu. K protažení jedné zubové mezery dojde velmi rychle (4 až 6 sekund). Protahování kuželových kol se používá v sériové a v hromadné výrobě, kde největší využití je v automobilovém průmyslu [17, 18].

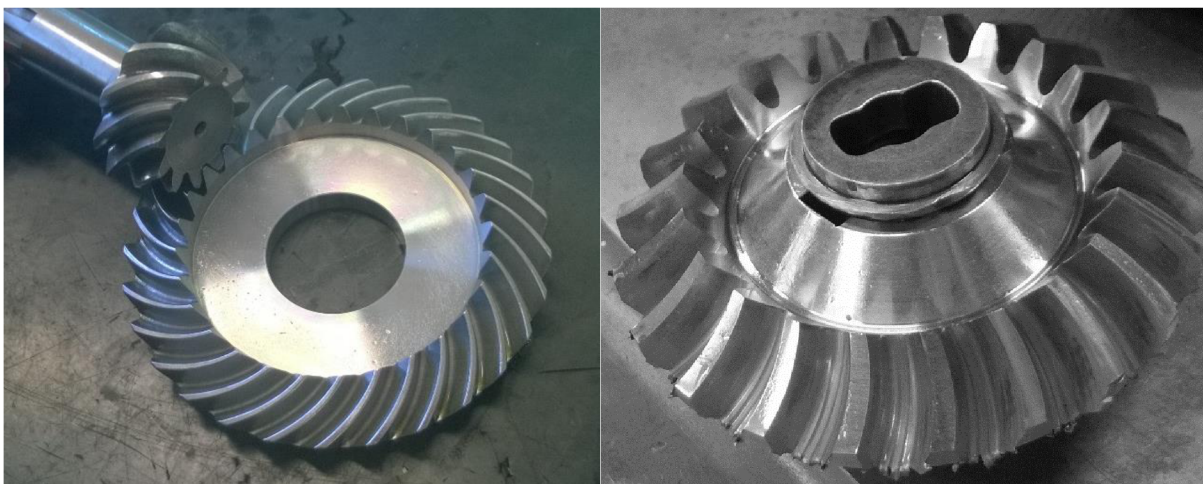


Obr. 2.8 Protahování kuželových kol [18].

### 2.2 Obrábění kuželových kol se zakřivenými zuby

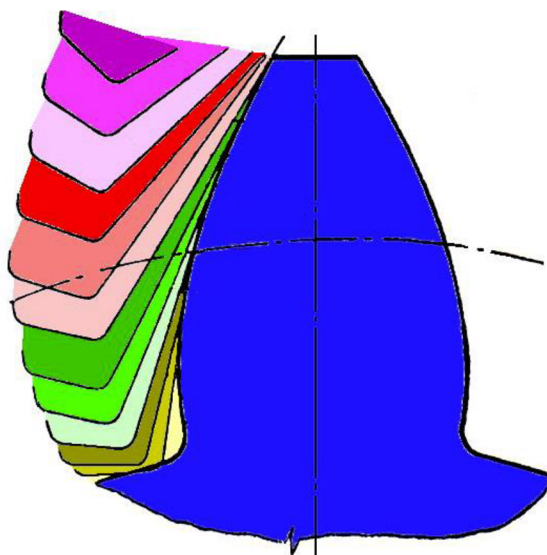
Kuželová kola se zakřivenými zuby (obr. 2.9) se obrábějí odvalovacím frézováním způsoby, které nesou název daného obráběcího stroje [17]:

- Gleason – kruhově zakřivené zuby (ozubení Zerol, Hypoid),
- Oerlikon – eloidní ozubení,
- Klingelnberg – paloidní nebo cyklopaloidní ozubení.



Obr. 2.9 Kuželové soukolí s paloidními zuby Klingelnberg (vlevo) a kuželové ozubené kolo s eloidním ozubením Oerlikon (vpravo).

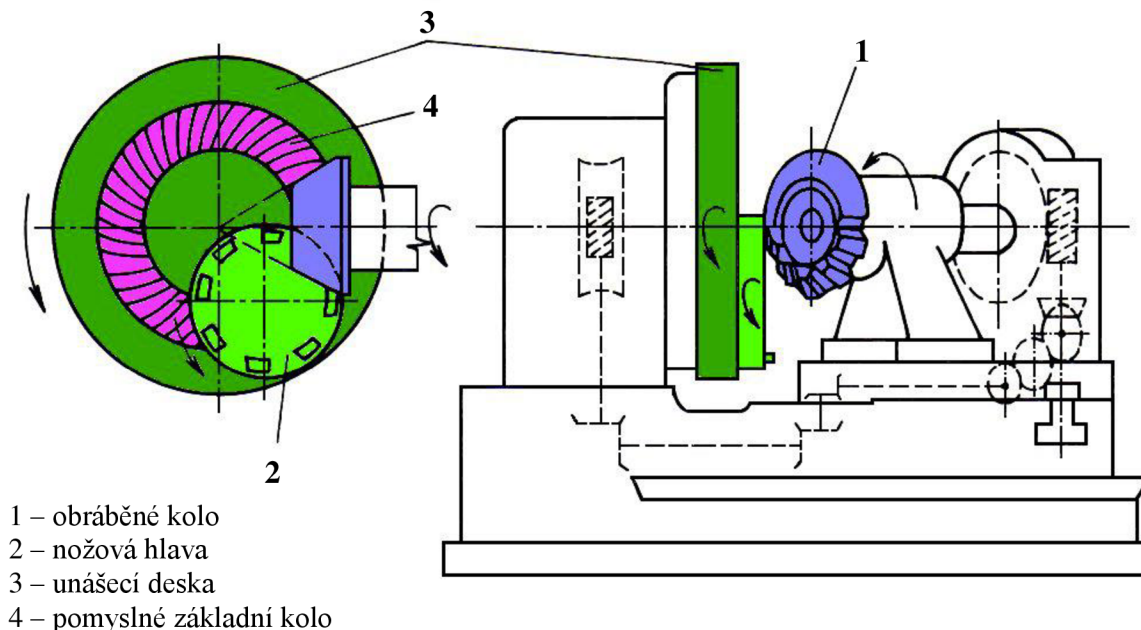
Na obr. 2.10 je znázorněn princip odvalování, tedy vytvoření evolventního profilu boku zubu.



Obr. 2.10 Evolventní profil boku zubu, vytvořen jednotlivými polohami nástroje vůči obrobku [18].

### 2.2.1 Způsob Gleason

Kuželová ozubená kola, jejichž tvar boční křivky zubu je kruhový oblouk, jsou vyráběna na strojích firmy Gleason. Jde o odvalovací frézování dělicím způsobem. Nástrojem je frézovací hlava, která má po obvodu rozestaveny nože s vnějším a vnitřním ostřím, upnutými střídavě za sebou. Nože mají lichoběžníkový tvar a úhel, který svírá ostří vnitřního a vnějšího nože, je dvojnásobkem úhlu záběru  $\alpha$  vyráběného kola. Princip vyplývá ze záběru základního kola s obráběným kolem. Základní kolo je nahrazeno unášecí deskou, na níž je frézovací hlava upnuta. Nožová hlava se otáčí řeznou rychlostí a nemá žádné vazby na ostatní pohyby. Kombinací otáčivého pohybu obrobku a natačením unášecí desky s nožovou hlavou vzniká odvalovací pohyb. K dosažení správného odvalovacího pohybu je zapotřebí, aby vrchol roztečného kužele obráběného kola byl totožný jako střed myšleného základního kola. Frézování způsobem Gleason je znázorněno na obr. 2.11 [17, 21].



Obr. 2.11 Frézování ozubení kuželových kol způsobem Gleason [18].

Nejprve se obrobek přisune na hloubku zubové mezery, kde se odvalovacím způsobem frézuje jedna zubová mezera. Po obrobení se obrobek odsune od frézy a potočí se o jednu úhlovou rozteč. Smysl otáčení unášecí desky se změní a následně se odvalí zpět do původní polohy. Takto se postupně obrobí všechny boky zubů kola [17, 21].

Frézovací hlavy se rozlišují na celistvé (obr. 2.12a), segmentové a se vsazenými noži (obr. 2.12b). Celistvé jsou vyrobeny z jednoho kusu materiálu a jsou používány pro obrábění malých kuželových kol. Segmentové hlavy jsou složeny ze skupin, které mají dva, tři, nebo čtyři nože přišroubované k hlavě. Hlavy se vsazenými noži mají po obvodu zářezy, do nichž se připevňují jednotlivé nože [21].

Frézovací hlavy se vsazenými noži mají tyto výhody [21]:

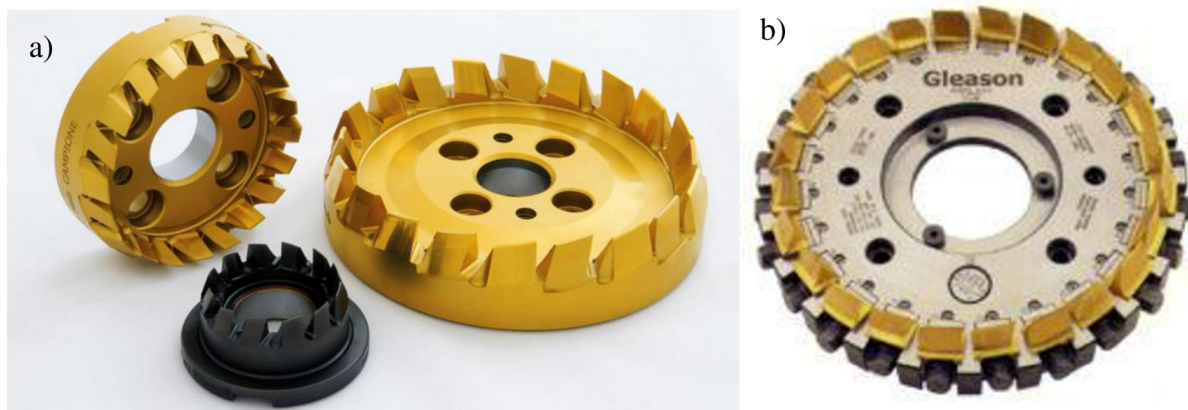
- jedna frézovací hlava slouží k upnutí různých druhů nožů,
- poškozené zuby se snadno vyměňují,
- velký počet frézovacích nožů (zvýšení produktivity a zmírnění opotřebení),
- nože ve frézovací hlavě lze přesně a jednoduše nastavovat do jmenovité polohy,
- frézovací nože jsou levné.

Frézovací hlavy se vsazenými noži se rozdělují na [21]:

- jednostranné,
- oboustranné.

Vsazené nože jednostranných fréz mají břity buď jen vnitřní, anebo jen vnější. U oboustranných fréz jsou nože s břity vnitřními a vnějšími vsazeny střídavě za sebou. Frézy jednostranné jsou určeny výhradně pro dokončování, zatímco frézy oboustranné jsou dokončovací i hrubovací [21].

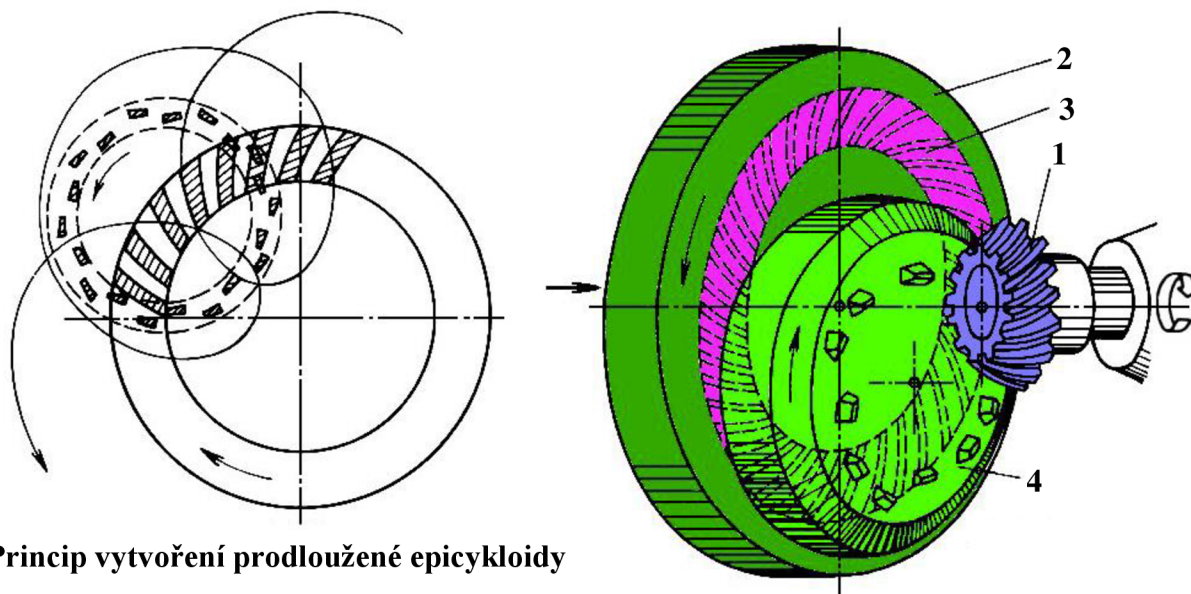
Způsobem Gleason se vyrábějí velmi přesná kuželová ozubená kola, která se často dokončují broušením nebo lapováním a jsou použita např. u obráběcích strojů.



Obr. 2.12 Frézovací nožové hlavy Gleason: a) celistvé, b) se vsazenými noži [22, 23].

### 2.2.2 Způsob Oerlikon

Stroje Oerlikon vytváří ozubená kola, jejichž boční křivka zubu má tvar epicykloidy. Jedná se o odvalovací frézování s plynulým odvalem (nejde o frézování dělicím způsobem jako např. u způsobu Gleason). Nástrojem je čelní nožová hlava s upnutými noži. Ozubení kuželového kola je vyráběno kombinací tří na sobě závislých pohybů a to rotačním pohybem nožové hlavy, rotačním pohybem obrobku a natáčením unášecí desky, na níž je excentricky upnuta čelní nožová hlava (obr. 2.13) [17, 18].

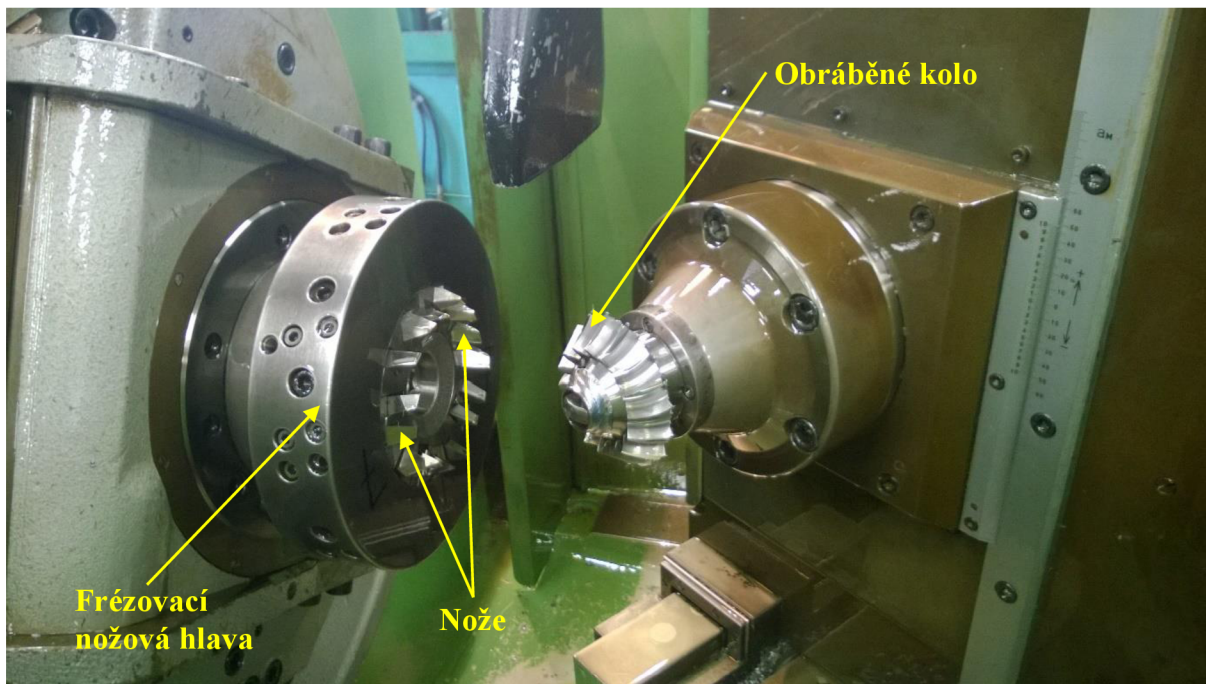


**Princip vytvoření prodloužené epicykloidy**

1 – obráběné kolo, 2 – unášecí deska, 3 – pomyslné základní kolo, 4 – nožová hlava.

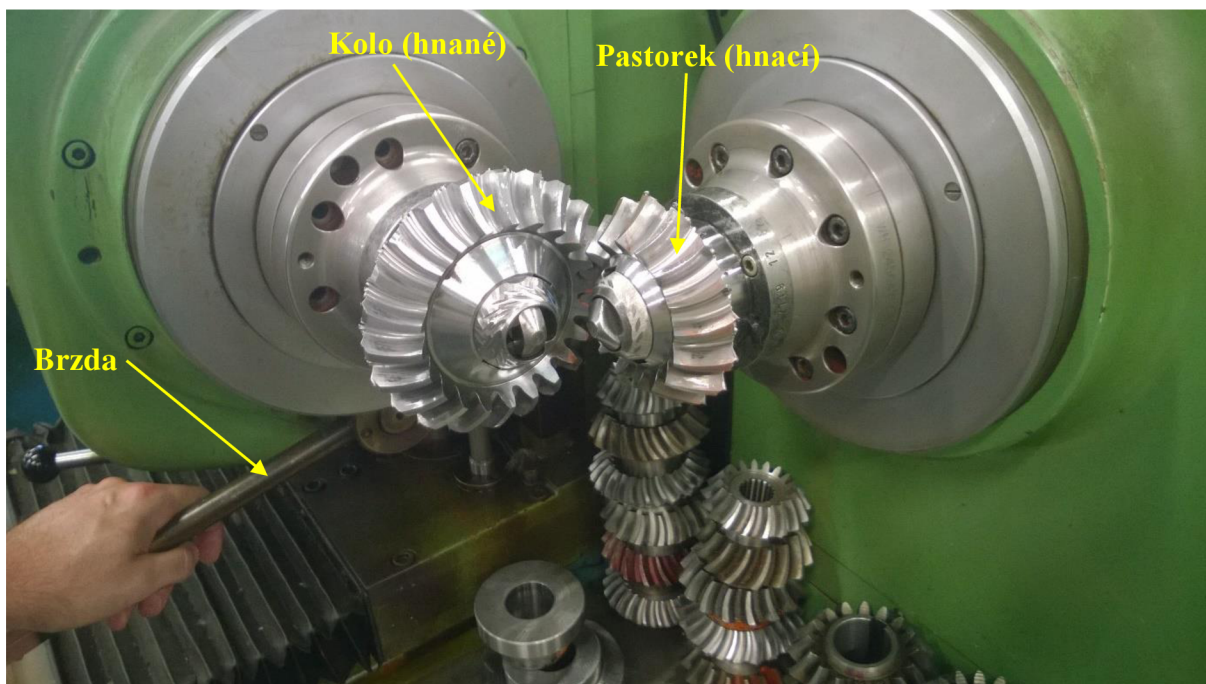
Obr. 2.13 Schéma frézování kuželových kol způsobem Oerlikon [10].

Nože upnuté v nožové hlavě (obr. 2.14) jsou rozděleny do tří skupin. První skupina nožů je určena k obrábění střední části zubové mezery, druhá a třetí skupina pak k obrábění boků zubů. Nože jsou upnuty tak, aby každá skupina tvořila části samotných spirál [17].



Obr. 2.14 Frézování kuželových kol způsobem Oerlikon.

Z důvodu velkých seřizovacích časů je způsob Oerlikon vhodný pouze pro sériovou výrobu. Pro výrobu je nezbytné použít dva stroje, kde jeden vyrobí pastorek a druhý kolo. Seřízení probíhá tak, že se do dvou nožových hlav upevní naostřené nože, které se zkontrolují na speciálním přístroji. Poté se nožové hlavy upevní do frézek Oerlikon – z důvodu vyšší hmotnosti frézovací hlavy bývá součástí stroje i malý jeřáb. Následně dojde k obrobení obou kol, které trvá řádově několik minut. Zuby takto obrobeného pastorku se natrou tuširovací barvou, pak se pastorek i kolo upnou do protáčecího zařízení (obr. 2.15).



Obr. 2.15 Zkoušení záběru kuželových ozubených kol Oerlikon na protáčecím zařízení.



Zkoušení probíhá za vysokých otáček a zároveň při brždění hnaného kola z důvodu zajištění podmínek, které jsou podobné budoucím provozním. Následuje kontrola míst dotyku zubů, na kterých je tuširovací barva vytlačena a posouzení, zda došlo k záběru na správném místě. V případě nesprávného dotyku zubů je nutno nože ve frézovacích nožových hlavách znovu přenastavit, obrobit nový pastorek i kolo a opakovat zkoušku. V případě, že dojde k vyhovujícímu záběru, může být započata výroba soukolí. Takové seřizování může trvat v některých případech i 2 pracovní směny.

Počet ozubených kol, vyrobených jednou nožovou hlavou, bývá přibližně 60 kusů (záleží na modulu a počtu zubů). Jelikož trvá výroba jednoho kola jen pár minut, je produktivita velmi vysoká. Velkou nevýhodou je ale nižší přesnost vyrobených kol, a proto se používají do strojů, které pracují se sníženými nároky (např. zemědělské stroje).

### 2.2.3 Způsob Klingelberg

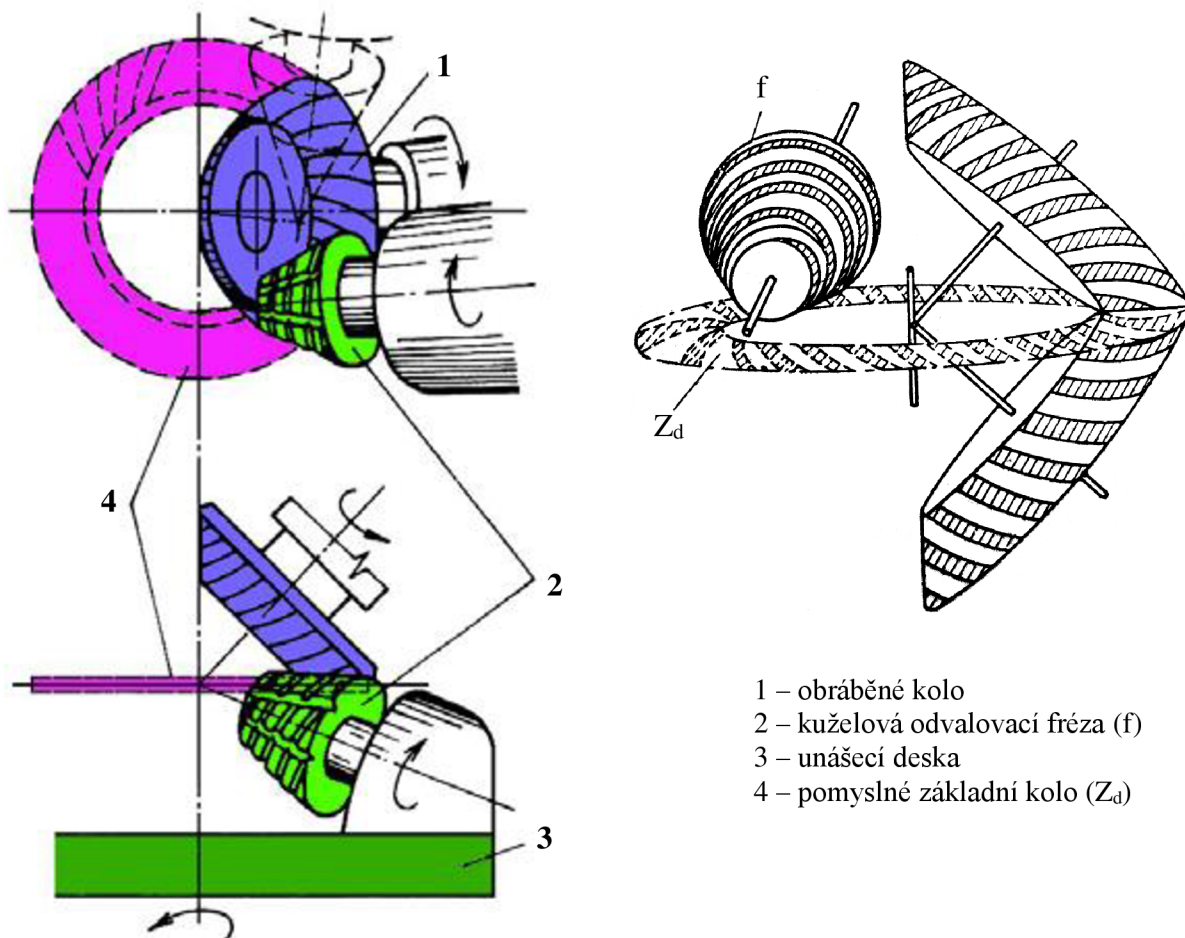
Jedná se o metodu, kterou se vyrábí buď paloidní nebo cyklopaloidní ozubení (stroje a nástroje jsou odlišné).

Kola s paloidním ozubením jsou vyráběna odvalovacím frézováním s plynulým odvalem, kde nástroj je kuželová odvalovací fréza (obr. 2.16). Zubové mezery jsou tvořeny kombinací tří na sobě závislých pohybů (podobně jako u metody Oerlikon) a to rotačního pohybu frézy, rotačního pohybu obrobku a odvalovacího pohybu frézy na unášecí desce [18].



Obr. 2.16 Kuželová odvalovací fréza samostatně (vlevo) a upevněná ve stroji (vpravo).

Na obr. 2.17 je znázorněn způsob frézování paloidního ozubení Klingelberg a soukolí paloidních kol, které zabírá společně se základním kolem. „Toto základní kolo představuje kruhovou dráhu, po které je vedena kuželová fréza f při frézování ozubení kuželového kola“ [24]. Seřizovací časy jsou v porovnání se způsobem Oerlikon velmi malé (v řádech minut). Samotné frézování však může trvat i několik desítek minut (v závislosti na velikostech rozměrů). Jak z výrobních časů vyplývá, metoda je vhodná spíše pro kusovou nebo malosériovou výrobu. Výhodou je však ozubení, u kterého se dosahuje vyšších přesností [18, 24].



Obr. 2.17 Frézování paloidního ozubení kuželových kol metodou Klingelnberg [18, 24].

Cyklopaloidní kuželová ozubená kola se frézují podobným způsobem jako u metody Oerlikon. Nástrojem je nožová hlava, která je dvoudílná a nože jsou v ní uspořádány tak, že v jedné části hlavy jsou nože vnitřní a ve druhé části hlavy nože vnější. Oba díly nožové hlavy lze vůči sobě vzájemně nastavovat a důsledkem toho nože vytváří křivky, které mají různé poloměry křivosti a tak vznikne požadované zakřivení s podélnou modifikací tvaru zubu. Tento způsob je velmi produktivní a je vhodný pro kuželová kola s menšími a středními moduly do průměru až 850 mm [18].

### 2.3 Rapid Prototyping (pouze metoda FDM)

Rapid Prototyping (RP) je soubor technologií, které vytvářejí fyzické prototypy přímo z digitálních dat a řadí se do skupiny aditivních technologií výroby (AM – z anglického Additive Manufacturing). Princip spočívá v nanášení materiálu po vrstvách s konstantní tloušťkou, kde každá vrstva je v podstatě průřez modelu. Čím tenčí vrstva se použije, tím bude kvalita prototypu vyšší, ale výrobní časy budou delší. Důvody tvorby prototypů jsou následující: vizualizace, nalezení chyb ve výrobní dokumentaci či koncepci, ověření smontovatelnosti a funkčnosti, tvorba forem pro odlévání nebo vstřikování [25, 26].

V tab. 2.1 jsou technologie RP rozděleny.

Tab. 2.1 Technologie Rapid Prototyping [26].

Druh materiálu modelu	Zkratka	Název
Na bázi tuhých materiálů	FDM	Fused Deposition Modeling
	LOM	Laminated Object Manufacturing
	MJM	Multi Jet Modeling
Na bázi fotopolymérů	SLA	Stereolithography
	SGC	Solid Ground Curing
Na bázi práškových materiálů	SLS	Selective Laser Sintering
	3DP	Three Dimensional Printing
	DMLS	Direct Metal Laser Sintering

Obecný postup při tvorbě prototypové součásti pomocí technologií RP [25]:

a) CAD

Tvorba součásti začíná u CAD systému, ve kterém se vytvoří 3D model. Ten může být plošný nebo objemový. Pro tvorbu modelu může být také použita technologie reverzního inženýrství.

b) Převod do formátu STL

Většina zařízení RP pracuje se souborovým formátem STL, který dokáže většina CAD systémů vytvořit. Model ve formátu \*.stl je tvořen plošnou trojúhelníkovou sítí, kde samotné trojúhelníky jsou definovány pomocí jejich vrcholů a jednotkových normálových vektorů. Při převodu do STL formátu může dojít k chybám, které mohou být způsobené např. orientací jednotkového normálového vektoru. K odstranění chyb existují specializované softwary, např. Magics od belgické firmy Materialise.

c) Úprava modelu

STL soubor, popisující tvar součásti, se naimportuje do příslušného softwaru, který dokáže přímo komunikovat s tiskárnou anebo pouze vytvoří G-kód. Dále se upraví velikost modelu (měřítko), pozice a jeho orientace.

d) Nastavení parametrů tisku

Před samotným tiskem musí být nastaveny jeho parametry jako typ materiálu, tloušťka vrstvy, procento výplně, kvalita tisku, atd. Příslušný software si vygeneruje data, která se pošlou do tiskárny.

e) Tisk součásti

Tvorba modelu probíhá zcela automaticky a může být do značné míry bez dozoru. Je zapotřebí občasné sledování k zamezení chyb, jako např. spotřebování materiálu, nebo pokud dojde k hardwarové či softwarové závadě.

f) Post processing

Vytisknutá součást většinou vyžaduje dodatečné úpravy a to buď z funkčního, nebo z estetického hlediska. Provádí se čištění a odstranění podpor, barvení, obrábění, tmelení, broušení, leštění, atd.

### Princip technologie FDM

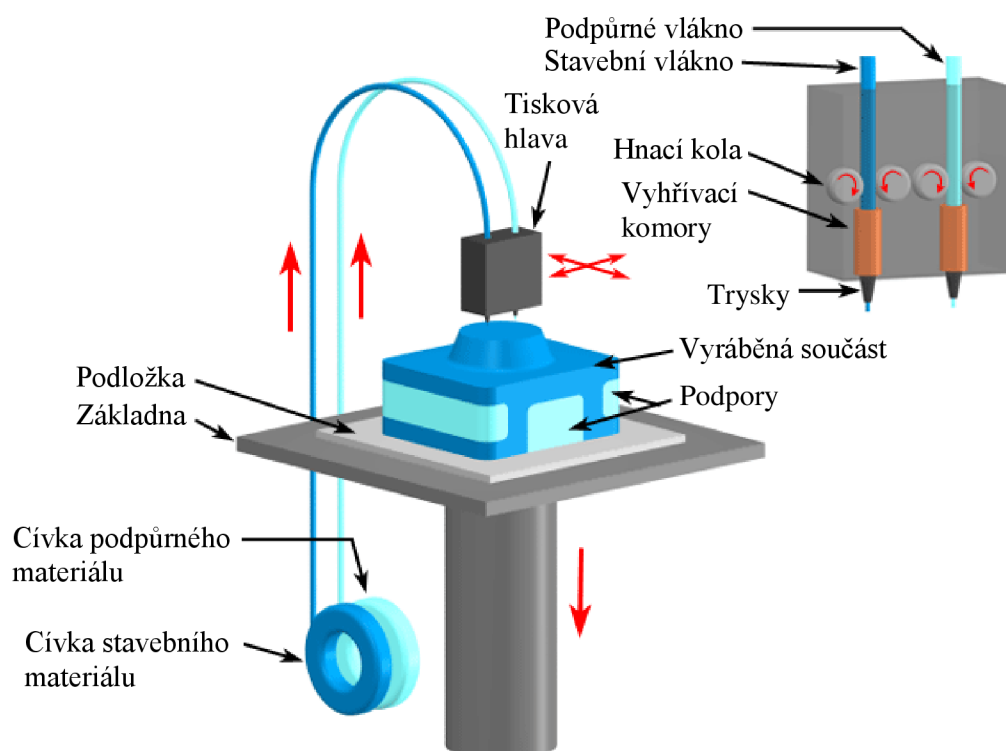
Termoplastický materiál ve formě vlákna (struny), který je navinut na cívce, je hnán do vyhřívané trysky, kde se nataví, a poté je nanášen po jednotlivých vrstvách na vyhřívanou podložku (obr. 2.18). Trysky jsou umístěny v tiskové hlavě, která se pohybuje v osách X a Y.

Po nanesení jedné vrstvy se základna (nebo tisková hlava) posune v ose Z o hodnotu jedné tloušťky vrstvy materiálu a začne se nanášet další vrstva. Podle tvaru modelu je často nezbytné použití podpor. Podpory mohou být buď ze stejného, nebo z jiného materiálu než je vyráběná součást. Odstranění podpor se provádí buď mechanicky anebo chemicky. Součásti mohou být vyráběny z různých materiálů, např. ABS, ABSplus, ABSi, PC, PC-ABS nebo ULTEM 9085, jejichž základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.2. Údaje od každého výrobce se mírně liší [25, 26, 27].

Mezi hlavní výhody patří výroba funkčních prototypů, jejichž vlastnosti se blíží konečným produktům a nízká cena prototypů. Mezi nevýhody patří: rychlost tisku, přesnost, anizotropie – vytištěná součást má v různých směrech jiné mechanické vlastnosti [25, 26].

Tab. 2.2 Přehled materiálů a jejich vlastností [27].

Materiál	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Mez pevnosti v ohybu [MPa]	Tažnost [%]
ABS	22	1,627	41	6
ABSplus	33	2,200	58	6
ABSi	37	1,920	62	4,4
PC	57	1,944	89	4,8
PC-ABS	34	1,810	59	5
ULTEM 9085	69	2,150	112	5,8



Obr. 2.18 Princip technologie FDM [28].

### 3 NÁVRH KUŽELOVÉHO SOUKOLÍ A TECHNOLOGIE VÝROBY

Součást je plastové kuželové soukolí typu N (nekorigované) s přímými zuby, které slouží k přenosu krouticího momentu mezi různoběžnými hřídeli o úhlu os  $\Sigma = 90^\circ$ . Převodové číslo je 2. Počet zubů hnacího kola je 25, jedná se tedy o převod do pomala. Základní parametry pastorku a spoluzabírajícího kola (dále jen kola) jsou uvedeny v tab. 3.1. Soukolí bude vyrobeno dvěma způsoby – obrážením dvěma noži a pomocí 3D tisku technologií FDM.

Výpočet počtu zubů kola [5]:

$$u = \frac{z_2}{z_1} \Rightarrow z_2 = u \cdot z_1 = 2 \cdot 25 = 50 \quad (3.1)$$

kde:  $u$  [-] - převodové číslo,  
 $z_1$  [-] - počet zubů hnacího pastorku,  
 $z_2$  [-] - počet zubů hnaného kola.

Tab. 3.1 Základní parametry kuželového soukolí.

	Pastorek (hnací)	Kolo (hnané)
Počet zubů	$z_1 = 25$	$z_2 = 50$
Vnější čelní modul	$m_{et} = 2 \text{ mm}$	
Úhel záběru čelní	$\alpha_t = 20^\circ$	
Úhel sklonu zubu	$\beta_m = 0^\circ$	
Úhel os	$\Sigma = 90^\circ$	
Korekce soukolí	$x = 0 \text{ mm}, x_\tau = 0 \text{ mm}$	
Šířka ozubení	$b = 14 \text{ mm}$	

#### 3.1 Výpočty rozměrů kuželového soukolí N s přímými zuby

Při výpočtu je nutno brát v potaz, že všechny rozměry, vztahující se k ozubení, musí být vypočteny velmi přesně (délkové rozměry na setiny milimetru, úhlové až na vteřiny) [6].

Úhly roztečných kuželů [8]:

$$\delta_1 = \arctg\left(\frac{1}{u}\right) = \arctg\left(\frac{1}{2}\right) = 26^\circ 33' 54'' = 26,565^\circ \quad (3.2)$$

$$\delta_2 = 90 - \delta_1 = 90 - 26,565 = 63^\circ 26' 6'' = 63,435^\circ \quad (3.3)$$

kde:  $\delta_1$  [-] - úhel roztečného kužele pastorku,  
 $\delta_2$  [-] - úhel roztečného kužele kola,  
 $u$  [-] - převodové číslo.

Vnější průměry roztečných kružnic [6]:

$$D_{e1} = m_{et} \cdot z_1 = 2 \cdot 25 = 50 \text{ mm} \quad (3.4)$$

$$D_{e2} = m_{et} \cdot z_2 = 2 \cdot 50 = 100 \text{ mm} \quad (3.5)$$

kde:	$D_{e1}$ [mm]	-	vnější průměr roztečné kružnice pastorku,
	$D_{e2}$ [mm]	-	vnější průměr roztečné kružnice kola,
	$m_{et}$ [mm]	-	vnější čelní modul,
	$z_1$ [-]	-	počet zubů pastorku,
	$z_2$ [-]	-	počet zubů kola.

Vnější výška hlavy zubu [6]:

$$h_{ae} = m_{et} = 2 \text{ mm} \quad (3.6)$$

kde:	$h_{ae}$ [mm]	-	vnější výška hlavy,
	$m_{et}$ [mm]	-	vnější čelní modul.

Vnější výška paty zubu [6]:

$$h_{fe} = m_{et} + c_a = 2 + 0,167m_{et} = 2 + 0,167 \cdot 2 = 2,334 \text{ mm} \quad (3.7)$$

kde:	$h_{fe}$ [mm]	-	vnější výška paty zubu,
	$m_{et}$ [mm]	-	vnější čelní modul,
	$c_a$ [mm]	-	hlavová vůle.

Vnější výška zubu [6]:

$$h_e = h_{ae} + h_{fe} = 2 + 2,334 = 4,334 \text{ mm} \quad (3.8)$$

kde:	$h_e$ [mm]	-	vnější výška zubu,
	$h_{ae}$ [mm]	-	vnější výška hlavy zubu,
	$h_{fe}$ [mm]	-	vnější výška paty zubu.

Vnější průměry hlavových kružnic [6]:

$$D_{ae1} = D_{e1} + 2 \cdot h_{ae} \cdot \cos(\delta_1) = 50 + 2 \cdot 2 \cdot \cos(26,565) = 53,578 \text{ mm} \quad (3.9)$$

$$D_{ae2} = D_{e2} + 2 \cdot h_{ae} \cdot \cos(\delta_2) = 100 + 2 \cdot 2 \cdot \cos(63,435) = 101,789 \text{ mm} \quad (3.10)$$

kde:	$D_{ae1}$ [mm]	-	vnější průměr hlavové kružnice pastorku,
	$D_{ae2}$ [mm]	-	vnější průměr hlavové kružnice kola,
	$D_{e1}$ [mm]	-	vnější průměr roztečné kružnice pastorku,
	$D_{e2}$ [mm]	-	vnější průměr roztečné kružnice kola,
	$h_{ae}$ [mm]	-	vnější výška hlavy zubu,
	$\delta_1$ [-]	-	úhel roztečného kužele pastorku,
	$\delta_2$ [-]	-	úhel roztečného kužele kola.

Vnější délka površky roztečného kužele [6]:

$$R_e = \frac{D_{e1}}{2 \cdot \sin(\delta_1)} = \frac{50}{2 \cdot \sin(26,565)} = 55,902 \text{ mm} \quad (3.11)$$

kde:  $R_e$  [mm] - vnější délka površky roztečného kužele,  
 $D_{e1}$  [mm] - vnější průměr roztečné kružnice pastorku,  
 $\delta_1$  [-] - úhel roztečného kužele pastorku.

Kontrola zvolené šířky ozubení [6]:

$$b < \frac{1}{3} \cdot R_e \Rightarrow 14 < \frac{1}{3} \cdot 55,902 \Rightarrow 14 < 18,634 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (3.12)$$

kde:  $b$  [mm] - šířka ozubení,  
 $R_e$  [mm] - vnější délka površky roztečného kužele.

Úhel hlavy zubu [6]:

$$\vartheta_a = \arctg\left(\frac{h_{ae}}{R_e}\right) = \arctg\left(\frac{2}{55,902}\right) = 2^\circ 2' 57'' = 2,049^\circ \quad (3.13)$$

kde:  $\vartheta_a$  [-] - úhel hlavy zubu,  
 $h_{ae}$  [mm] - vnější výška hlavy zubu,  
 $R_e$  [mm] - vnější délka površky roztečného kužele.

Úhel paty zubu [6]:

$$\vartheta_f = \arctg\left(\frac{h_{fe}}{R_e}\right) = \arctg\left(\frac{2,334}{55,902}\right) = 2^\circ 23' 27'' = 2,391^\circ \quad (3.14)$$

kde:  $\vartheta_f$  [-] - úhel paty zubu,  
 $h_{fe}$  [mm] - vnější výška paty zubu,  
 $R_e$  [mm] - vnější délka površky roztečného kužele.

Úhel zubu [6]:

$$\vartheta = \vartheta_a + \vartheta_f = 2,049 + 2,391 = 4^\circ 26' 24'' = 4,440^\circ \quad (3.15)$$

kde:  $\vartheta$  [-] - úhel zubu,  
 $\vartheta_a$  [-] - úhel hlavy zubu,  
 $\vartheta_f$  [-] - úhel paty zubu.

Úhly hlavových kuželů [6]:

$$\delta_{a1} = \delta_1 + \vartheta_a = 26,565 + 2,049 = 28^\circ 36' 51'' = 28,614^\circ \quad (3.16)$$

$$\delta_{a2} = \delta_2 + \vartheta_a = 63,435 + 2,049 = 65^\circ 29' 3'' = 65,484^\circ \quad (3.17)$$

kde:  $\delta_{a1}$  [-] - úhel hlavového kužele pastorku,  
 $\delta_{a2}$  [-] - úhel hlavového kužele kola,  
 $\delta_1$  [-] - úhel roztečného kužele pastorku,  
 $\delta_2$  [-] - úhel roztečného kužele kola,  
 $\vartheta_a$  [-] - úhel hlavy zubu.

Úhly patních kuželů [6]:

$$\delta_{f1} = \delta_1 - \vartheta_f = 26,565 - 2,391 = 24^\circ 10' 27'' = 24,174^\circ \quad (3.18)$$

$$\delta_{f2} = \delta_2 - \vartheta_f = 63,435 - 2,391 = 61^\circ 2' 39'' = 61,044^\circ \quad (3.19)$$

kde:  $\delta_{f1}$  [-] - úhel patního kužele pastorku,  
 $\delta_{f2}$  [-] - úhel patního kužele kola,  
 $\delta_1$  [-] - úhel roztečného kužele pastorku,  
 $\delta_2$  [-] - úhel roztečného kužele kola,  
 $\vartheta_f$  [-] - úhel paty zubu.

### 3.2 Výroba soukolí obrážením dvěma noži

Na základě vypočtených hodnot z kapitoly 3.1 byly vytvořeny výrobní výkresy pro pastorek i kolo (příloha 3, příloha 4) [29].

Soukolí bude vyrobeno ve strojovém parku firmy Bondy, s. r. o., technologií obrážením dvěma noži. Podle výkresové dokumentace byla také firmou sestavena cenová nabídka včetně časového plánu, který je uveden v tab. 3.2 a příloze 5. Materiál byl zvolen POM-H (ertacetal H). Jedná se o acetalový homopolymer, který je vhodný pro výrobu přesných mechanických součástí s velmi dobrou obrobiteľností. Materiál se dále vyznačuje nízkou tepelnou roztažností a dobrou odolností proti otěru. Základní fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tab. 3.1 [10, 29].

Tab. 3.1 Vlastnosti materiálu POM-H [10, 29].

Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Maximální provozní teplota (trvalá/krátkodobá) [°C]	Mez kluzu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Tažnost [%]
1,43	90/150	70	3,6	35



Tab. 3.2 Časy pro výrobu jedné součásti od firmy Bondy, s. r. o.

Součást	Operace	Čas přípravy [min]	Čas strojní [min]	Čas celkový [min]
Pastorek	řezat	10	2,70	302,03
	soustružit CNC	120	7,94	
	obrážet drážku	20	4,30	
	ozubení	120	14,72	
	začištění	-	2,37	
Kolo	řezat	10	5,50	337,12
	soustružit CNC	120	14,82	
	obrážet drážku	20	12,60	
	ozubení	120	29,45	
	začištění	-	4,75	

### 3.3 Výroba soukolí technologií FDM

Před samotnou tvorbou modelu v CAD softwaru Autodesk Inventor 2015 bylo potřeba posoudit technologičnost konstrukce podle vytvořené výkresové dokumentace. Technologičnost konstrukce je souhrn vlastností technicko-ekonomického charakteru. Vzhledem k tvaru a funkčnosti kuželového ozubeného soukolí byly posouzeny následující parametry [30]:

a) Volba materiálu

Tisk bude probíhat ve firmě ultimat3D s. r. o. ve které jsou k dispozici materiály ABS, PLA, HIPS, PET a Laywoo-D3. Soukolí nebude pracovat za vysokých teplot a bude namáháno pouze mechanicky. Kvůli těmto parametrům a ceně byl zvolen materiál ABS.

b) Tvar součásti

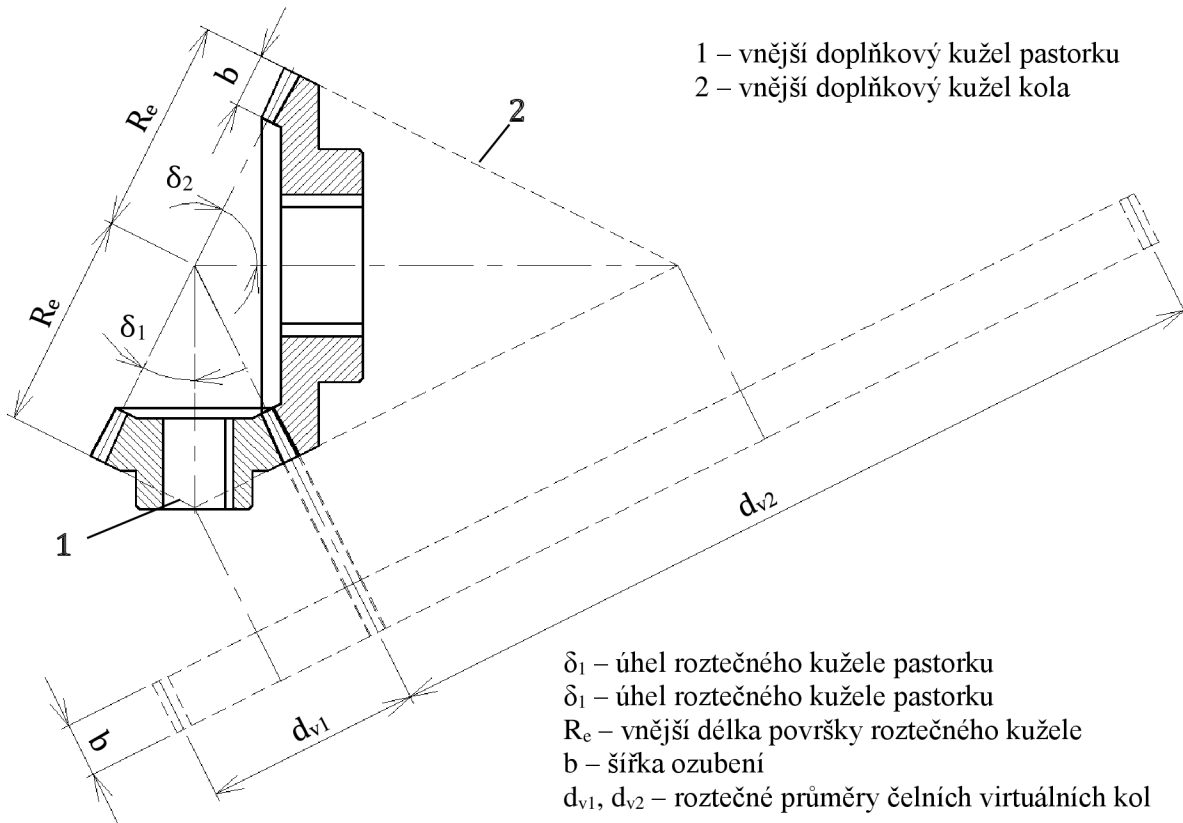
Funkční prvky jsou zuby a otvory s drážkami pro těsná pera. Pro správnou souosost by otvory měly být vrtány, ale pro úsporu času a materiálu byla tato skutečnost zanedbána. Jelikož nejsou kuželová ozubená kola pro technologii FDM tvarově složitá, je výroba realizovatelná.

c) Základna součásti

Pro ustavení obou kol vůči pracovnímu stolu bylo nutné zvolit vhodné základny. Byly zvoleny plochy kolmé k osám otáčení každého z ozubených kol. U pastorku je to plocha s  $\varnothing 30$  a u kola s  $\varnothing 60$ . Jsou to plochy, které jsou dostatečně velké a díky kterým by podpůrný materiál nezasahoval do zubových mezer.

### 3.3.1 Výpočet virtuálního soukolí a tvorba modelu

Model byl vytvořen pomocí programu Autodesk Inventor 2015. Program umožňuje vytvořit soukolí pomocí generovaného modelu, který vznikne zadáním základních parametrů soukolí. Při pohledu na vygenerovaná kola bylo však patrné, že profil zubů nebyl evolventní, tudíž se soukolí nehodilo pro následný 3D tisk. Evolventní profil lze nakreslit i ručně, vyjde-li se z předpokladu, že evolventa vznikne popsáním trajektorie bodu, ležícího na přímce, která se odvaluje po základní kružnici. Bylo tedy nutné, převést kuželové soukolí na virtuální čelní soukolí (obr. 3.1) pomocí vnějších doplňkových kuželů. Pro modelování ozubení bylo nezbytné spočítat základní parametry virtuálních kol.



Obr. 3.1 Vznik virtuálního soukolí z kuželového soukolí [5].

Počty zubů virtuálních kol [5]:

$$z_{v1} = \frac{z_1}{\cos(\delta_1)} = \frac{25}{\cos(26,565)} = 27,951 \quad (3.20)$$

$$z_{v2} = \frac{z_2}{\cos(\delta_2)} = \frac{50}{\cos(63,435)} = 111,804 \quad (3.21)$$

kde:  $z_{v1}$  [-] - počet zubů virtuálního pastorku,  
 $z_{v2}$  [-] - počet zubů virtuálního kola,  
 $z_1$  [-] - počet zubů pastorku,

- $z_2$  [-] - počet zubů kola,  
 $\delta_1$  [-] - úhel roztečného kužele pastorku,  
 $\delta_2$  [-] - úhel roztečného kužele kola.

Převodové číslo virtuálního soukolí [5]:

$$u_v = \frac{z_{v2}}{z_{v1}} = \frac{111,804}{27,951} = 4 \quad (3.22)$$

- kde:  $u_v$  [-] - převodové číslo virtuálního soukolí,  
 $z_{v1}$  [-] - počet zubů virtuálního pastorku,  
 $z_{v2}$  [-] - počet zubů virtuálního kola.

Průměry roztečných kružnic virtuálních kol [5]:

$$d_{v1} = \frac{D_{e1}}{\cos(\delta_1)} = \frac{50}{\cos(26,565)} = 55,902 \text{ mm} \quad (3.23)$$

$$d_{v2} = \frac{D_{e2}}{\cos(\delta_2)} = \frac{100}{\cos(63,435)} = 223,607 \text{ mm} \quad (3.24)$$

- kde:  $d_{v1}$  [mm] - průměr roztečné kružnice virtuálního pastorku,  
 $d_{v2}$  [mm] - průměr roztečné kružnice virtuálního kola,  
 $D_{e1}$  [mm] - vnější průměr roztečné kružnice pastorku,  
 $D_{e2}$  [mm] - vnější průměr roztečné kružnice kola,  
 $\delta_1$  [-] - úhel roztečného kužele pastorku,  
 $\delta_2$  [-] - úhel roztečného kužele kola.

Průměry základních kružnic virtuálních kol [5]:

$$d_{vb1} = d_{v1} \cdot \cos(\alpha_t) = 55,902 \cdot \cos(20) = 52,530 \text{ mm} \quad (3.25)$$

$$d_{vb2} = d_{v2} \cdot \cos(\alpha_t) = 223,607 \cdot \cos(20) = 210,122 \text{ mm} \quad (3.26)$$

- kde:  $d_{vb1}$  [mm] - průměr základní kružnice virtuálního pastorku,  
 $d_{vb2}$  [mm] - průměr základní kružnice virtuálního kola,  
 $d_{v1}$  [mm] - průměr roztečné kružnice virtuálního pastorku,  
 $d_{v2}$  [mm] - průměr roztečné kružnice virtuálního kola,  
 $\alpha_t$  [-] - úhel záběru čelní.

Průměry hlavových kružnic virtuálních kol [5]:

$$d_{va1} = d_{v1} + 2 \cdot h_{ae} = 55,902 + 2 \cdot 2 = 59,902 \text{ mm} \quad (3.27)$$

$$d_{va2} = d_{v2} + 2 \cdot h_{ae} = 223,607 + 2 \cdot 2 = 227,607 \text{ mm} \quad (3.28)$$

- kde:  $d_{va1}$  [mm] - průměr hlavové kružnice virtuálního pastorku,

- $d_{va2}$  [mm] - průměr hlavové kružnice virtuálního kola,
- $d_{v1}$  [mm] - průměr roztečné kružnice virtuálního pastorku,
- $d_{v2}$  [mm] - průměr roztečné kružnice virtuálního kola,
- $h_{ae}$  [mm] - vnější výška hlavy zubu.

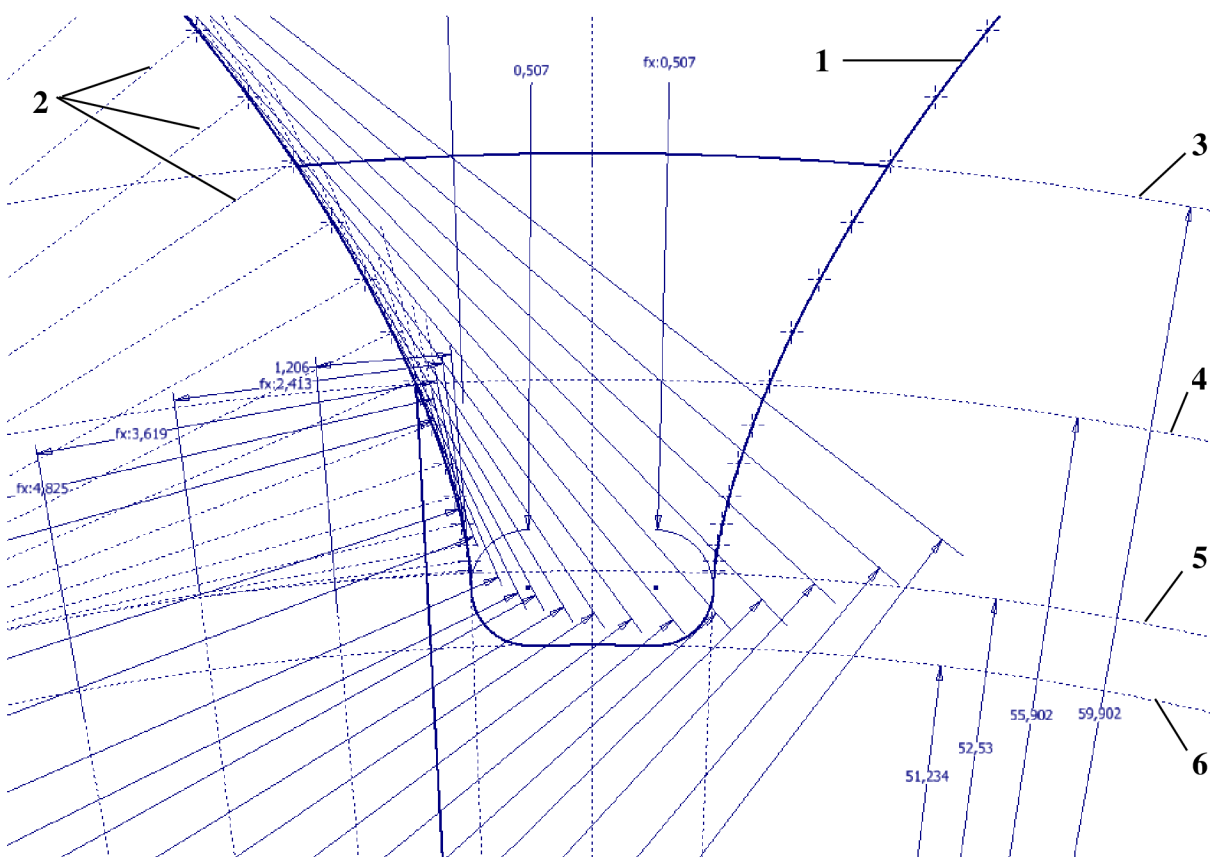
Průměry patních kružnic virtuálních kol [5]:

$$d_{vf1} = d_{v1} - 2 \cdot h_{fe} = 55,902 - 2 \cdot 2,334 = 51,234 \text{ mm} \quad (3.29)$$

$$d_{vf2} = d_{v2} - 2 \cdot h_{fe} = 223,607 - 2 \cdot 2,334 = 218,939 \text{ mm} \quad (3.30)$$

- kde:
- $d_{vf1}$  [mm] - průměr patní kružnice virtuálního pastorku,
  - $d_{vf2}$  [mm] - průměr patní kružnice virtuálního kola,
  - $d_{v1}$  [mm] - průměr roztečné kružnice virtuálního pastorku,
  - $d_{v2}$  [mm] - průměr roztečné kružnice virtuálního kola,
  - $h_{fe}$  [mm] - vnější výška paty zubu.

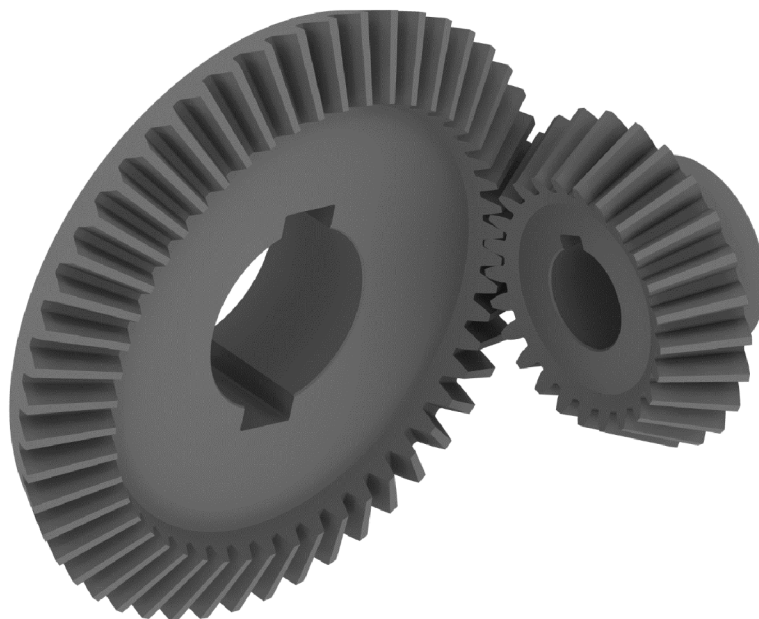
Díky výše vypočteným hodnotám již bylo možné vytvořit části čelního virtuálního soukolí. Na obr. 3.2 je znázorněna tvorba evolventy virtuálního pastorku a následný vznik zubové mezery, která zároveň leží na vnějším doplňkovém kuželi modelu pastorku.



1 – evolventa, 2 – přímka, odvalující se po základní kružnici, 3 – hlavová kružnice virtuálního kola, 4 – roztečná kružnice virtuálního kola, 5 – základní kružnice virtuálního kola, 6 – patní kružnice virtuálního kola.

Obr. 3.2 Tvorba zubové mezery pomocí softwaru Autodesk Inventor 2015.

Vzniklý model pastorku i kola (obr. 3.4) bylo nutné vyexportovat do souborů ve formátu \*.stl.



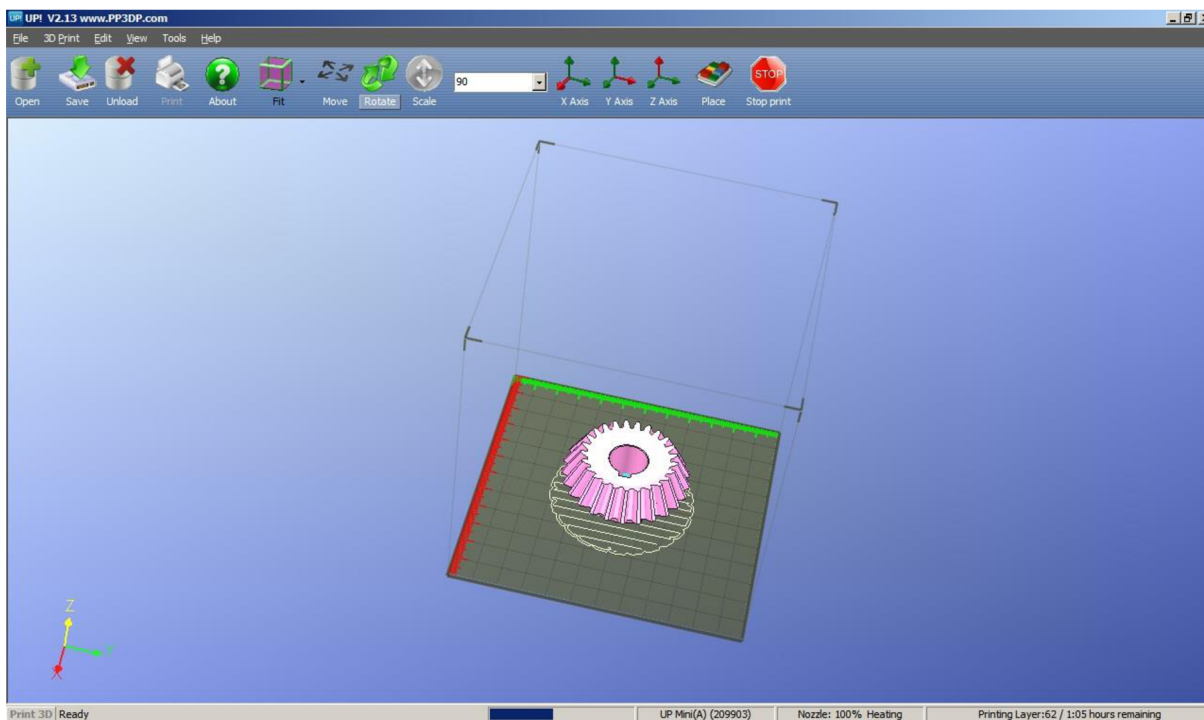
Obr. 3.3 Model kuželového soukolí s přímým ozubením.

### 3.3.2 Tisk součásti

Tisk kuželových ozubených kol probíhal na tiskárně PP3DP UP! Mini (obr. 3.4). Kvůli velikosti byly kolo i pastorek vytisknuty samostatně. Soubory s modely ve formátu \*.stl byly nainportovány do softwaru, který je k této tiskárně dodáván. Po importu se musel model správně ustavit a naorientovat v pracovním prostoru (obr. 3.5). Následně byly zvoleny hlavní parametry tisku. U pastorku i kola byla nastavena vysoká kvalita tisku, tloušťka vrstvy 0,2 mm a procento výplně 50 %. Poté se spustil proces, kdy program spočítal počet vrstev, místa vložení podpor (u této tiskárny jsou podpory tvořeny ze stejného materiálu jako výrobek) a trajektorii tiskové hlavy v každé vrstvě. Výsledkem byl zdrojový G-kód, který software nahrál pomocí USB kabelu do tiskárny.

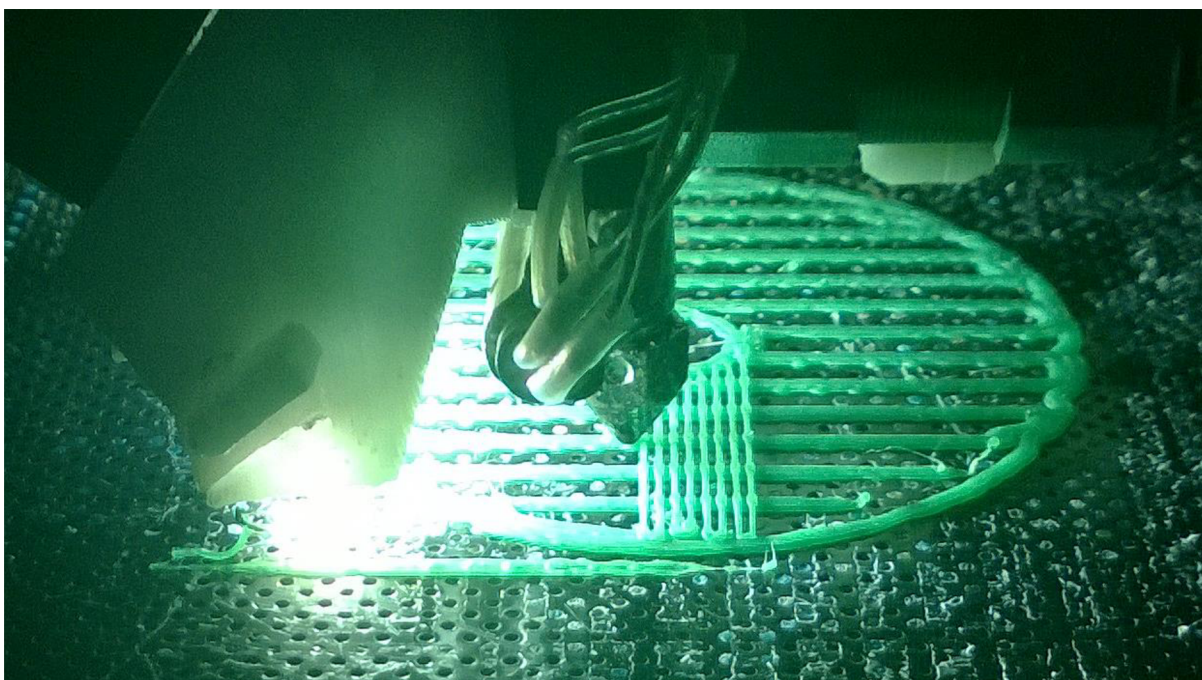


Obr. 3.4 Použitá tiskárna pro výrobu kuželového soukolí.



Obr. 3.5 Uživatelské prostředí programu.

Následoval tisk, kdy byla v každé vrstvě nejdříve vytvořena kontura a poté výplň daného kuželového kola. Princip nanášení vrstev je na obr. 3.6. Pastorek byl vyroben za 1 hodinu a 52 minut, kolo za 5 hodin a 43 minut. Podpory byly odstraněny mechanicky. Vytisknuté kuželové ozubené soukolí je na obr. 3.7.



Obr. 3.6 Počáteční fáze tisku pastorku.



Obr. 3.7 Vytisknuté kuželové ozubené soukolí.

## 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola se zabývá technicko-ekonomickým porovnáním dvou variant výroby kuželového ozubeného soukolí – výrobu obrážením a technologií FDM.

### 4.2 Technické zhodnocení

Kritérium pro hodnocení obou metod je hodnota Ra na povrchu kola. Na bocích zubů je předepsána hodnota Ra = 1,6 μm, kterou se obrážením dosáhne. U technologie FDM je tato hodnota dána zvolenou tloušťkou vrstvy, která byla v tomto případě 0,2 mm, ale která požadovanou hodnotu Ra nezajistí. Během záběhu soukolí ale k určitému vyhlazení dojde.

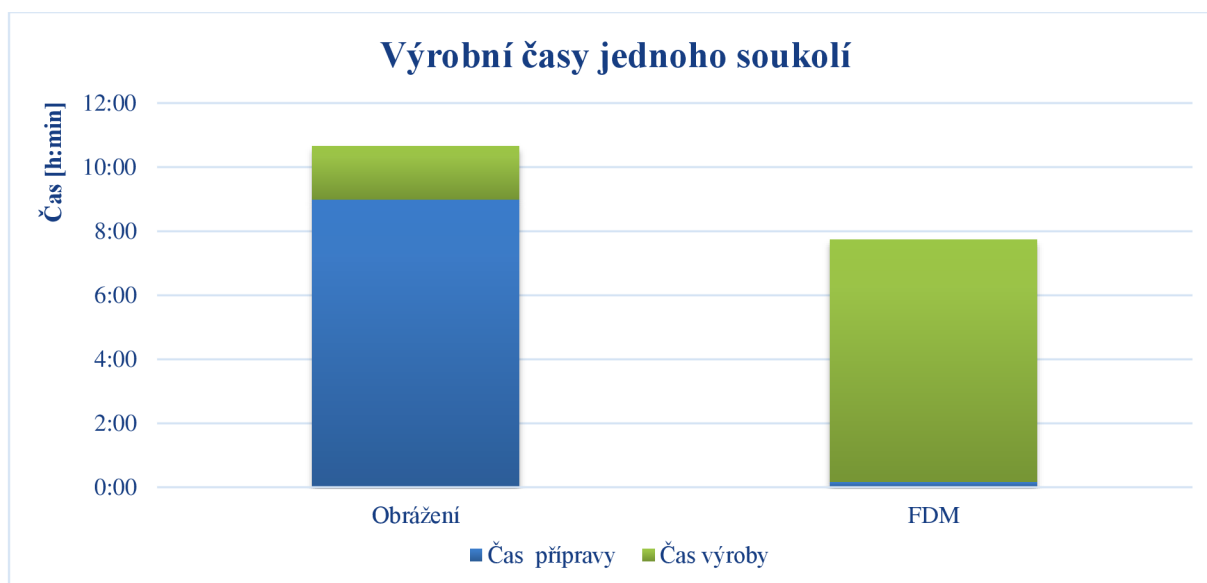
Z hlediska přenášení krouticího momentu ale soukolí, vyrobeno technologií FDM, patrně vyhovovat nebude. Důvodem je materiál ABS, který má jednu zásadní nevýhodu – při větším zatížení praská po vrstvách. Soukolí je tedy vhodné spíše ke kinematickým převodům.

### 4.2 Ekonomické zhodnocení

Mezi důležité faktory při ekonomickém hodnocení patří časová náročnost výroby a cena. V tab. 4.1 a obr. 4.1 jsou porovnány výrobní časy jednoho soukolí. U výroby obrážením je čas přípravy 9 hodin. Příčinou jsou dlouhé seřizovací časy obrážedky na ozubení a tvorba programů pro CNC soustruh. Čas přípravy u technologie FDM je 10 minut z důvodu úpravy STL souborů a odstranění podpor. I přes dobu tisku 7 h a 35 min je celkový čas kratší u této technologie než u obrážením. Do časů přípravy není započtena tvorba výkresové dokumentace ani tvorba modelů.

Tab. 4.1 Výrobní časy jednoho soukolí.

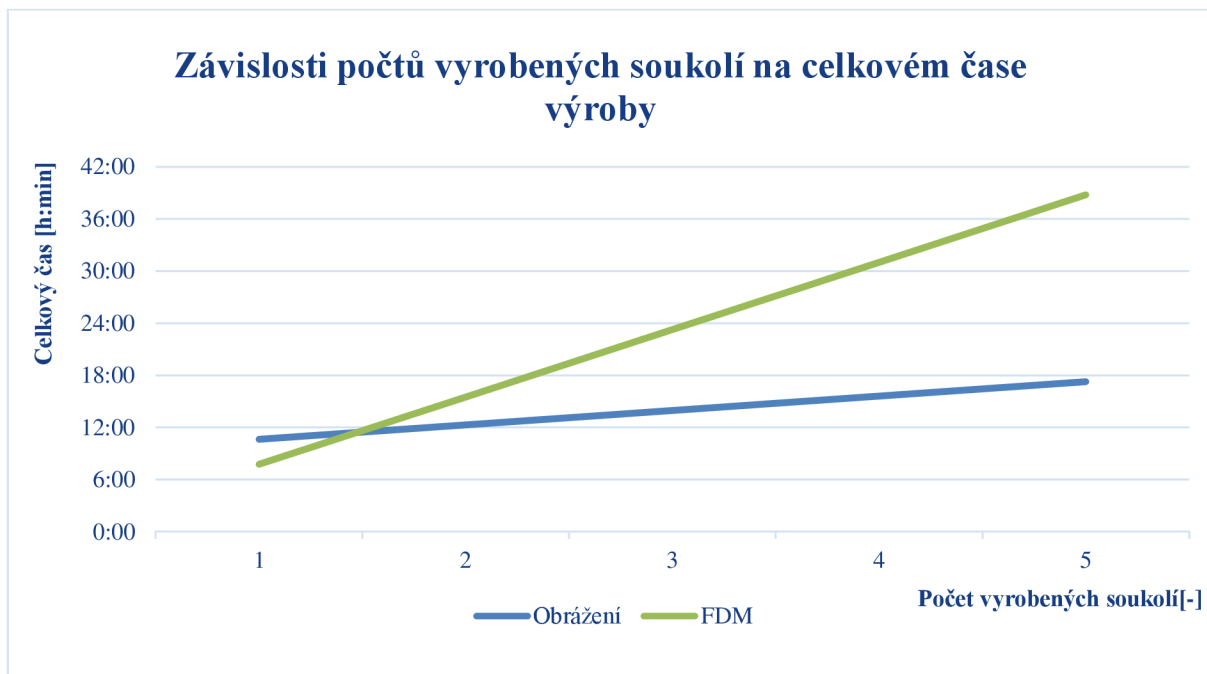
Výrobní technologie	Čas přípravy	Čas strojní	Čas celkový
Obrážením	9 h 0 min	1 h 40 min	10 h 40 min
FDM	0 h 10 min	7 h 35 min	7 h 45 min



Obr. 4.1 Časové porovnání metod výroby jednoho soukolí.



Na obr. 4.2 jsou znázorněny celkové výrobní časy počtů soukolí 1 až 5 u obou technologií. Při tvorbě grafu byly vzaty hodnoty z tab. 4.1 (např. pro počet soukolí 5 byla hodnota času přípravy sečtena s pětinasobkem času strojního). Z grafu plyne, že již při výrobě dvou soukolí jsou celkové výrobní časy kratší u obrázení.



Obr. 4.2 Počty vyrobených soukolí v závislosti na celkovém čase výroby.

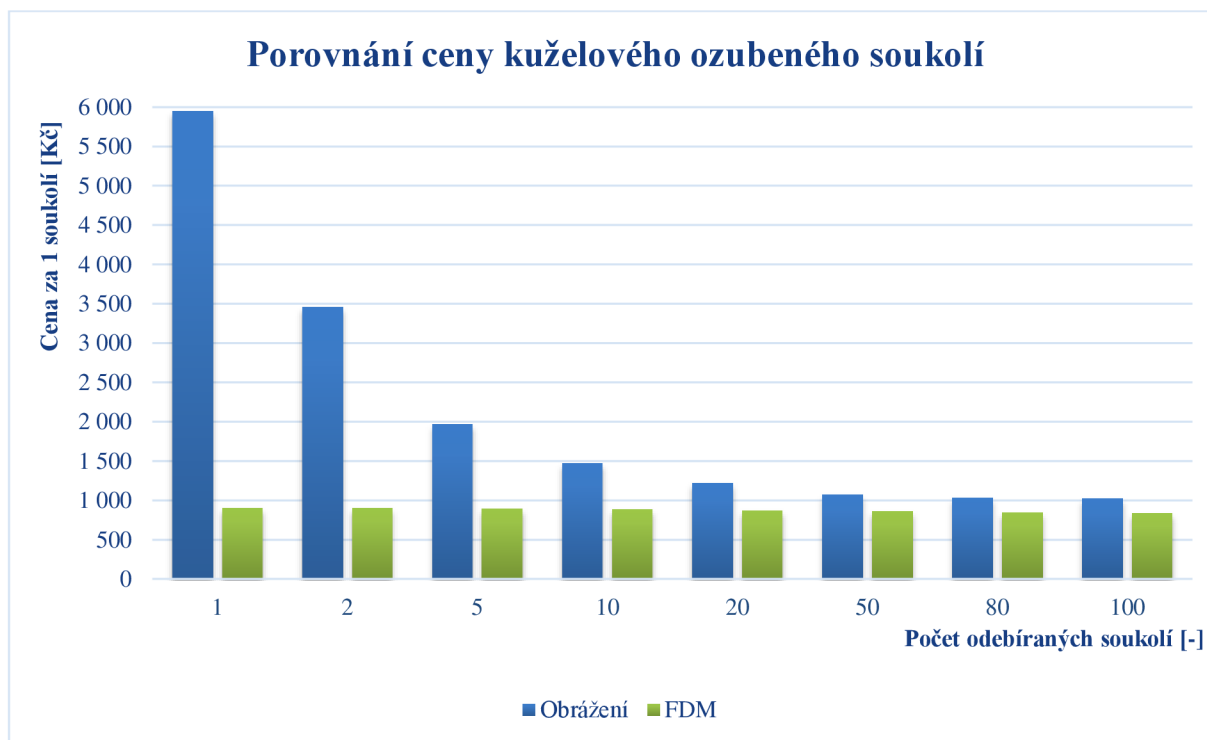
Cenová nabídka pro výrobu soukolí obrázením je v tab. 4.2 a v příloze 6. Pro výrobu technologií FDM jsou ceny uvedeny v tab. 4.3 a příloze 7. Na základě těchto hodnot byl sestaven graf (obr. 4.3), který porovnává cenu soukolí u jednotlivých technologií.

Tab. 4.2 Cenová nabídka od firmy Bondy, s. r. o., (cena bez DPH).

Počet odebíraných kusů	Cena za 1 pastorek [Kč]	Cena za 1 kolo [Kč]	Cena za 1 soukolí [Kč]
1	2 786	3 164	5 950
2	1 541	1 919	3 460
5	794	1 172	1 966
10	545	923	1 468
20	420	799	1 219
50	345	724	1 069
80	327	705	1 032
100	320	699	1 019

Tab. 4.3 Cenová nabídka od firmy ultimat3D s. r. o. (cena bez DPH).

Počet odebíraných kusů	Cena za 1 pastorek [Kč]	Cena za 1 kolo [Kč]	Cena za 1 soukolí [Kč]
1	200	700	900
20	190	680	870
100	180	650	830



Obr. 4.3 Porovnání cen u kuželového ozubeného soukolí.

---

## 5 DISKUZE

Kuželové soukolí s přímými zuby je navrženo pro přenos krouticího momentu mezi různoběžnými hřídeli s úhlem os  $90^\circ$ . Spojení hřídelů s ozubenými koly je realizováno pomocí těsných per. Není uvažován přenos velkých krouticích momentů za velkých obvodových rychlostí či za vysokých teplot, a proto byl zvolen plastový materiál. Pro obrázení POM-H (ertacetal H) a pro tisk ABS (Akrylonitrilbutadienstyren).

Vzhledem k tomu, že jsou kuželová ozubená kola velmi specifický druh strojních součástí, nebyla pro obrázení provedena kontrola technologičnosti konstrukce.

Hlavním problémem při výrobě soukolí metodou FDM je rozměrová přesnost a kvalita povrchu. Tyto nedostatky je ale možné eliminovat pomocí změn parametrů tisku. Změnou tloušťky vrstvy z 0,2 mm na 0,1 mm se sice dosáhne zlepšení kvality povrchu, doba tisku by ale byla dvojnásobná. Ke zlepšení mechanických vlastností by bylo potřeba použít jiný materiál jako např. ABSplus nebo PC-ABS.

Přes všechny nedostatky je vytisknuté soukolí vhodné jako funkční prototyp, jehož hlavní výhodou je cena. Ta je v porovnání s obrázením, při výrobě jednoho soukolí, přibližně o 85 % nižší.

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo popsat problematiku výroby kuželových ozubených kol a porovnat konvenční způsob výroby s technologií FDM. V úvodní části byly představeny základní druhy kuželových ozubených kol, jejich výhody a nevýhody. Značná část práce se zabývala výrobou technologií obrábění, kde byly popsány jednotlivé typy strojů pro výrobu ozubení.

Rozsah praktické části práce je shrnut v následujících bodech:

- Bylo navrženo soukolí, přenášející krouticí moment mezi různoběžnými hřídeli o úhlu os  $90^\circ$ , s převodovým číslem 2, kde hnací kolo (pastorek) má 25 zubů a hnané kolo 50 zubů.
- Výrobní výkresy pastorku i kola byly vytvořeny na základě výpočtů, které jsou v práci uvedeny.
- Materiál byl zvolen POM-H pro výrobu obrážením dvěma noži. Z firmy Bondy, s. r. o., byla dodána cenová nabídka včetně časového plánu výroby.
- Bylo provedeno zhodnocení technologičnosti konstrukce pro tisk soukolí technologií FDM. Byl zvolen materiál ABS, posouzen tvar pastorku i kola a byla provedena volba základen pro tisk.
- Při tvorbě modelů v softwaru Autodesk Inventor 2015 byly evolventní profilové křivky zubů tvořeny ručně, neboť generátor kuželových ozubených kol tyto křivky nahrazuje oblouky. Modely byly poté převedeny do souborů \*.stl.
- Tisk probíhal ve firmě ultim3D s. r. o. Modely byly nahrány do příslušného softwaru, který je k tiskárně dodáván, a po nastavení všech hlavních parametrů tisku došlo k vyrobění pastorku i kola. Firmou byla poskytnuta i cenová nabídka.
- V závěru práce jsou obě technologie porovnány z technicko-ekonomického hlediska.

Celkový výrobní čas jednoho soukolí je u obrázení 10 hodin a 40 minut, u FDM tisku 7 hodin a 45 minut. Z grafu *Závislosti počtů vyrobených soukolí na celkovém čase výroby* (obr. 4.2) však plyne, že již při výrobě dvou soukolí jsou celkové výrobní časy kratší u obrázení. Důvodem je čas přípravy, který je u obrázení 9 hodin a který zahrnuje seřizovací časy obrázečky na ozubení, tvorbu NC programů apod. Čas přípravy u FDM tisku je pouze 10 minut, z důvodu úprav \*.stl modelů a odstranění podpůrného materiálu ze součástí.

V grafu *Porovnání ceny kuželového ozubeného soukolí* (obr. 4.3) je vidět, že cena je vždy příznivější pro FDM tisk, např. při výrobě 1 soukolí bude cena tisku 900 Kč bez DPH a cena u obrázení 5 950 Kč bez DPH.

Využití technologie FDM pro výrobu kuželových ozubených kol je v konstrukci funkčních prototypů. Hlavní výhodou je cena, která je při odběru malého počtu kusů několikanásobně nižší než u konvenční technologie.

---

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] JELASKA, Damir. *Gears and gear drives* [online]. Hoboken: John Wiley and Sons, 2012, 444 s. [vid. 2015-03-22]. ISBN 9781118392706. Dostupné z: <http://site.ebrary.com/lib/VUTBRFME/detail.action?docID=10602111>
- [2] Teatechnik.cz [online]. *T.E.A. TECHNIK s.r.o.* ©2007 [vid. 2015-03-22]. Dostupné z: [http://www.teatechnik.cz/img/produkty/ozubeni\\_a\\_prevody/kuzelova\\_soukoli/ocelova.jpg](http://www.teatechnik.cz/img/produkty/ozubeni_a_prevody/kuzelova_soukoli/ocelova.jpg)
- [3] Manutencaoesuprimentos.com [online]. *Manutenção & Suprimentos.* ©2015 [vid. 2015-03-22]. Dostupné z: [http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/imagens/caracteristicas-das-engrenagens-hipoides\\_.jpg](http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/imagens/caracteristicas-das-engrenagens-hipoides_.jpg)
- [4] BOLEK, Alfred. KOCHMAN, Josef. *Části strojů – 2. svazek. 5. přeprac. vyd.* Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 707 s. Technický průvodce. ISBN 80-030-0426-8.
- [5] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí.* Vysoké učení technické v Brně: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [6] KRÍŽ, R., K. WEIGNER a J. AUDYOVÁ. *Stavba a provoz strojů II: Převody.* Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1978, 176 s.
- [7] VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. *Konstruování strojů: Převody* [online], Studijní materiály a opory. [vid. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky>
- [8] Geocaching.com [online]. *Geocaching.* [vid. 2015-04-10]. Dostupné z: [http://www.geocaching.com/geocache/GC514F5\\_prevodove-kolo?guid=61327734-9401-4164-893c-48fe510d59cd](http://www.geocaching.com/geocache/GC514F5_prevodove-kolo?guid=61327734-9401-4164-893c-48fe510d59cd)
- [9] KRÍŽ, Rudolf. *Strojnické tabulky II: Pohony.* 1. vyd. Ostrava: Montanex, 1997, 213 s. ISBN 80-857-8051-8.
- [10] Eppplasty.cz [online]. *EPP Plasty a.s.* ©2012 [vid. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz>
- [11] E-konstrukter.cz [online]. *E-konstrukter: Portál pro strojní konstruktéry.* ©2013 [vid. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/prevodni-tabulka-znaceni-oceli>
- [12] TICHÁ, Šárka a Ivan MRKVICA. *Vybrané kapitoly ze strojirenské metrologie* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. [vid. 2015-04-12]. ISBN 978-80-248-2709-4. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2709-4.pdf>

- 
- [13] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 180 s. ISBN 80-214-3338-8.
- [14] Ravegears.com [online]. *Rave Gears and Machining*. [vid. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.ravegears.com/wp-content/uploads/2013/01/klingelnberg-P65-gear-analyzer.jpg>
- [15] Zeiss.cz [online]. *ZEISS*. [vid. 2015-04-13]. Dostupné z: [http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs\\_cz/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo-navigator.html](http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo-navigator.html)
- [16] Alicona.cz [online]. *Alicona Metrology*. [vid. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.aliconac.com/home/products/infinitefocus.html>
- [17] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [18] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 2. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004, 94 s. [vid. 2015-04-20]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-2cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf)
- [19] Uvp3d.cz [online]. *Výroba ozubených kol a řemenic*. [vid. 2015-04-20]. Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP\\_STROJ\\_ST48\\_004.jpg](http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP_STROJ_ST48_004.jpg)
- [20] Mlgeardesigns.blog.cz [online]. *Výroba kuželových ozubených kol se zakřivenými zuby*. [vid. 2015-04-20]. Dostupné z: [http://nd06.jxs.cz/853/110/c57c573b87\\_95632393\\_o2.jpg](http://nd06.jxs.cz/853/110/c57c573b87_95632393_o2.jpg)
- [21] BUREŠ, Jan. *Kuželová kola s obloukovým ozubením Gleason*. 1. vyd. Praha: SNTL - Státní vydavatelství technické literatury, 1962, 135 s.
- [22] Minitoolscoating.cz [online]. *Solid mill cutters for bevel gears – Gleason type*. [vid. 2015-04-25]. Dostupné z: [http://www.minitoolscoating.com/uploads/images/Gallery/Frese\\_integrali/frese\\_integrali\\_6.jpg](http://www.minitoolscoating.com/uploads/images/Gallery/Frese_integrali/frese_integrali_6.jpg)
- [23] Gleason.cz [online]. *Cutting tools*. [vid. 2015-04-25]. Dostupné z: [http://www.gleason.com/uploads/products\\_images/header\\_image\\_0147.jpg](http://www.gleason.com/uploads/products_images/header_image_0147.jpg)
- [24] KLEPAL, Václav a Jan BUREŠ. *Kuželová ozubená kola s paloidními zuby Klingelnberg*. 1. vyd. Praha: SNTL – Státní vydavatelství technické literatury, 1961, 121 s.
- [25] Gibson, Ian, David W. Rosen a Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping To Direct Digital Manufacturing* [online]. New York: Springer, 2010, 459 s. [vid. 2015-04-29]. ISBN: 978-1-4419-1120-9. Dostupné z: [http://search.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=340900&lang=cs&site=ehost-live&ebv=EB&ppid=pp\\_Cover](http://search.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=340900&lang=cs&site=ehost-live&ebv=EB&ppid=pp_Cover)
-

- [26] VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. *Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping* [online]. Studijní materiály a opory. [vid. 2015-05-01]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto\\_bak/cv\\_STV\\_04\\_Aditivni\\_techologie\\_metody\\_Rapid\\_Prototyping.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_techologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf)
- [27] Stratasys.com [online]. *Stratasys*. ©2015 [vid. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/>
- [28] Custompart.net [online]. *Custompart*. ©2008 [vid. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>
- [29] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [30] ZEMČÍK, Oskar. *Technologické procesy: část obrábění* [online]. Učební texty kombinovaného bakalářského studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 54 s. [vid. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnProcesy.pdf>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
3D	Three Dimensional,
3DP	Three Dimensional Printing,
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren,
AM	Additive Manufacturing,
CAD	Computer Aided Design,
CNC	Computer Numerical Control,
DMLS	Direct Metal Laser Sintering,
DPH	Daň z přidané hodnoty,
FDM	Fused Deposition Modeling,
HIPS	High Impact Polystyren,
LOM	Laminated Object Manufacturing,
MJM	Multi Jet Modeling,
NC	Numeric Control,
PC	Polykarbonát,
PET	Polyethylentereftalát,
PLA	Polylactic Acid,
POM-H	Polyoxymetylen homopolymer,
RP	Rapid Prototyping,
SLA	Stereolithography Apparatus,
SLS	Selective Laser Sintering,
SGC	Solid Ground Curing,
STL	STereoLithography,
USB	Universal Serial Bus.

Značka	Jednotka	Popis
$D_{ae1}$	[mm]	vnější průměr hlavové kružnice pastorku,
$D_{ae2}$	[mm]	vnější průměr hlavové kružnice kola,
$D_{e1}$	[mm]	vnější průměr roztečné kružnice pastorku,
$D_{e2}$	[mm]	vnější průměr roztečné kružnice kola,
$F_{a1}$	[N]	axiální složka síly $F$ ,
$F_N$	[N]	normálová síla,
$F_{r1}$	[N]	radiální složka síly $F$ ,
$F_t$	[N]	tečná složka síly $F$ ,
$M_{t1}$	[N·mm]	přiváděný točivý moment,
$R_e$	[mm]	vnější délka površky roztečného kužele,
$b$	[mm]	šířka ozubení,
$c_a$	[mm]	hlavová vůle,
$d$	[mm]	průměr roztečné kružnice,
$d_{m1}$	[mm]	střední roztečný průměr,



Značka	Jednotka	Popis
$d_{v1}$	[mm]	průměr roztečné kružnice virtuálního pastorku,
$d_{v2}$	[mm]	průměr roztečné kružnice virtuálního kola,
$d_{va1}$	[mm]	průměr hlavové kružnice virtuálního pastorku,
$d_{va2}$	[mm]	průměr hlavové kružnice virtuálního kola,
$d_{vb1}$	[mm]	průměr základní kružnice virtuálního pastorku,
$d_{vb2}$	[mm]	průměr základní kružnice virtuálního kola,
$d_{vf1}$	[mm]	průměr patní kružnice virtuálního pastorku,
$d_{vf2}$	[mm]	průměr patní kružnice virtuálního kola,
$h_{ae}$	[mm]	vnější výška hlavy zubu,
$h_e$	[mm]	vnější výška zubu,
$h_{fe}$	[mm]	vnější výška paty zubu,
$m$	[mm]	modul,
$m_{et}$	[mm]	vnější čelní modul,
$m_{mn}$	[mm]	střední normální modul,
$p$	[mm]	rozteč,
$u$	[-]	převodové číslo,
$u_v$	[-]	převodové číslo virtuálního soukolí,
$z$	[-]	počet zubů,
$z_1$	[-]	počet zubů pastorku,
$z_2$	[-]	počet zubů kola,
$z_{v1}$	[-]	počet zubů virtuálního pastorku,
$z_{v2}$	[-]	počet zubů virtuálního kola,
$\alpha_{mn}$	[-]	úhel záběru střední normální,
$\alpha_t$	[-]	úhel záběru čelní,
$\beta_m$	[-]	střední úhel sklonu boční křivky zubu,
$\delta$	[-]	úhel roztečného kužele,
$\delta_1$	[-]	úhel roztečného kužele pastorku,
$\delta_2$	[-]	úhel roztečného kužele kola,
$\delta_{a1}$	[-]	úhel hlavového kužele pastorku,
$\delta_{a2}$	[-]	úhel hlavového kužele kola,
$\delta_{f1}$	[-]	úhel patního kužele pastorku,
$\delta_{f2}$	[-]	úhel patního kužele kola,
$\vartheta$	[-]	úhel zubu,
$\vartheta_a$	[-]	úhel hlavy zubu,
$\vartheta_f$	[-]	úhel paty zubu.

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1.....	Kuželové soukolí se šípovými zuby
Příloha 2.....	Moderní měřicí přístroje
Příloha 3.....	Výrobní výkres pastorku
Příloha 4.....	Výrobní výkres kola
Příloha 5.....	Kalkulace pastorku a kola
Příloha 6.....	Cenová nabídka firmy Bondy, s. r. o.
Příloha 7.....	Cenová nabídka firmy ultimat3D s. r. o.

## PŘÍLOHA 1

### Kuželové soukolí se šípovými zuby

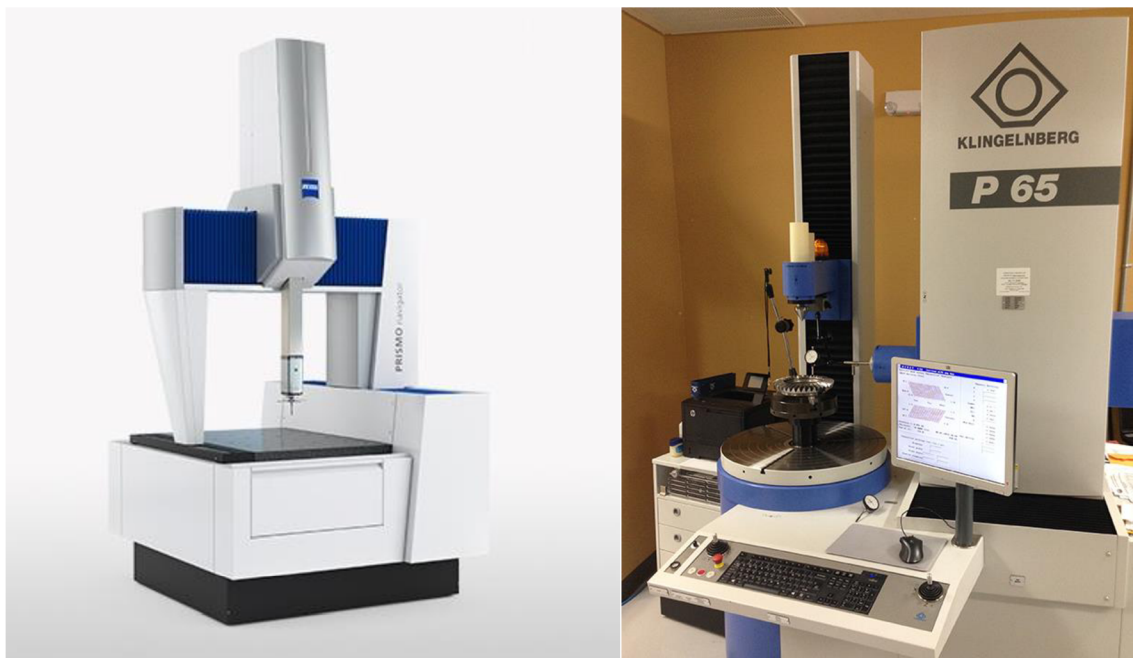
Soukolí bylo vyrobeno firmou Citroën pro vodní elektrárnu Mířejovice. Dnes již není v provozu a je k vidění v Kralupech nad Vltavou [8].



## PŘÍLOHA 2

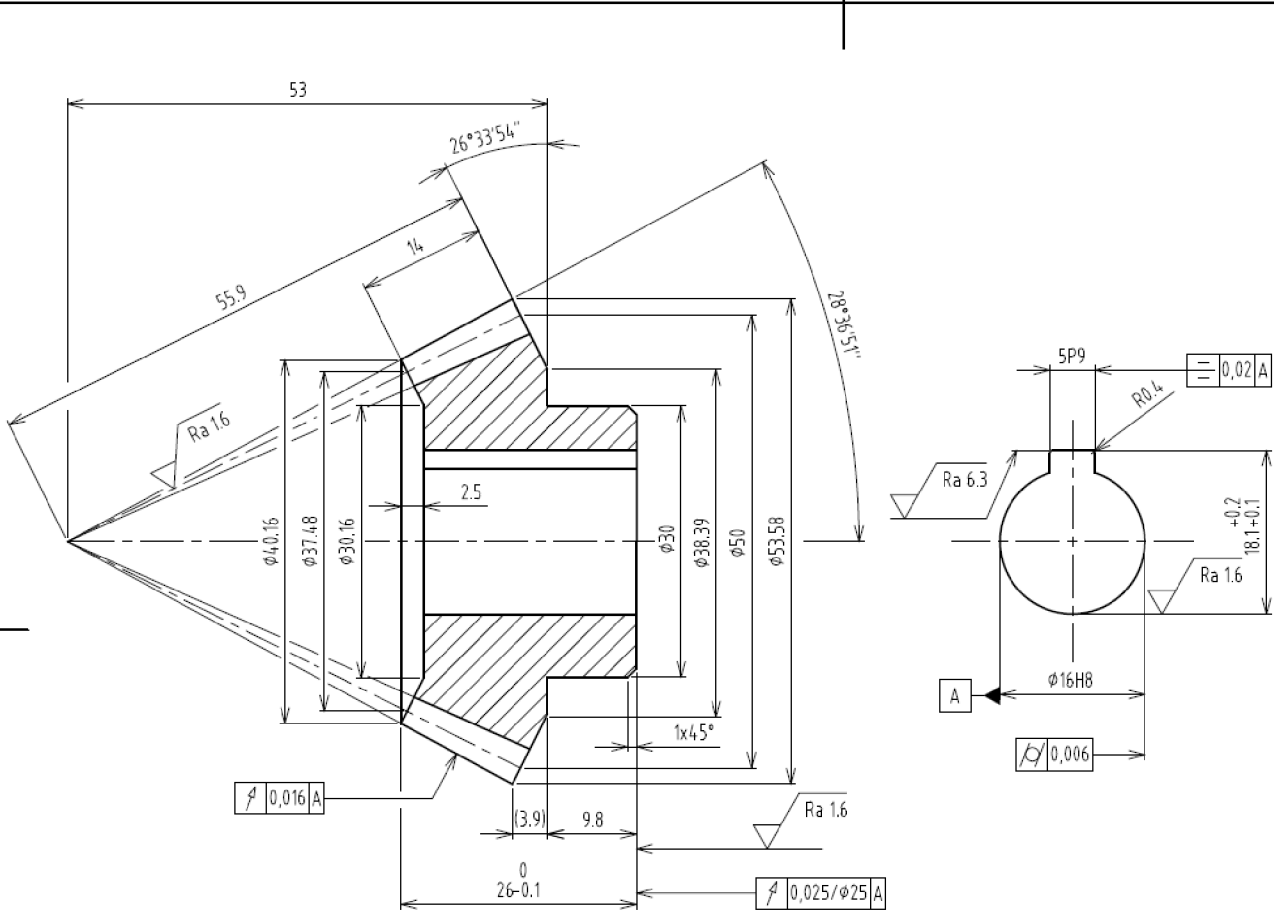
### Moderní měřicí přístroje

Na obrázcích jsou moderní přístroje firem ZEISS, Klingelberg a Alicona, které se používají k měření různých veličin kuželových ozubených kol [14, 15, 16].



# PŘÍLOHA 3

Výrobní výkres pastorku

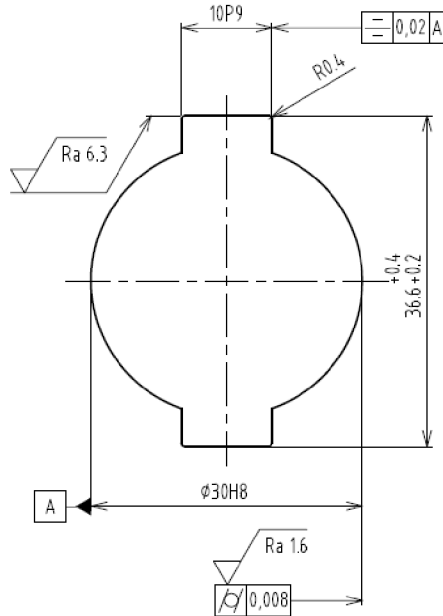
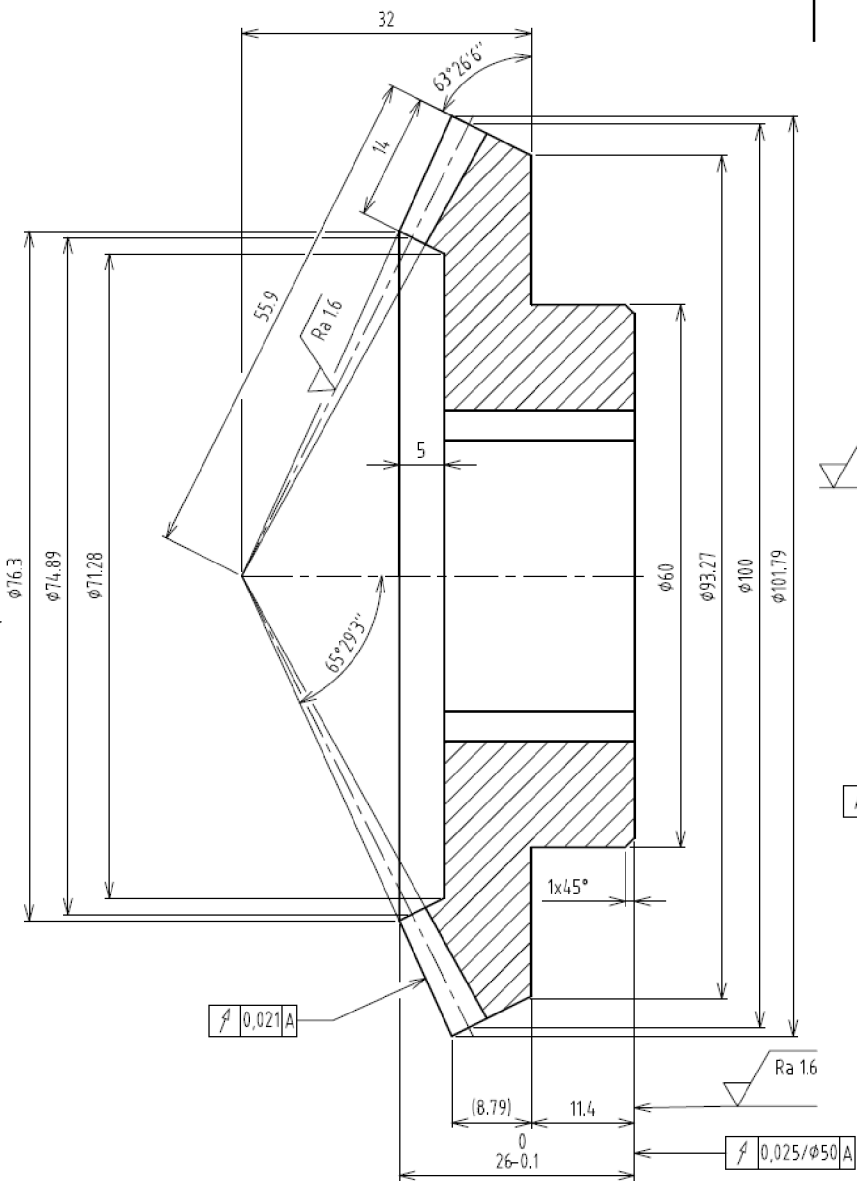


Vnější čelní modul	$m_e$	2	
Počet zubů	$z$	25	
Normální základní profil	-	ČSN ISO 677	
Úhel sklonu boční křivky zubu	$\beta_m$	0°	
Úhel záběru	$\alpha_i$	20°	
Smysl stoup. boční křivky zubu	-	-	
Jednotkové posunutí radiální	$x$	0	
Jednotkové posunutí tangenciální	$x_t$	0	
Stupeň přesnosti podle	-	ISO 17485	
Kontrolované mezní úchytky	dvoubokého odvalu za otáčku	$F_i''$	-
	dvoubokého odvalu za rozteč	$f_i''$	-
	sklonu zubu	$F_{\beta}$	-
Kontrolní rozměr	tloušťky zubů na konst. těživě	$s_{ce}$	-
	výšky hlavy zubů	$h_{ce}$	-
Spoluzabírající kolo	číslo výkresu	$x$	VUT-FSI-BP-02
	počet zubů	$z$	50
	úhel os	$\Sigma$	90°
Střední normální modul	$m_m$	1,75	
Počet zubů základního virt. kola	$z_v$	27,95	
Průměr základní kružnice	$d_b$	52,53	
Úhel roztečného kužele	$\delta$	26°33'54"	
Úhel patního kužele	$\delta_f$	24°10'27"	
Úhel hlavy	$\theta_a$	2°2'57"	
Úhel paty	$\theta_f$	2°23'27"	

Struktura povrchu: Ra 3.2	Hrany: L-0,3 h0,3	Měřítko <b>2:1</b>	Přesnost	ISO 2768-mK
			Tolerování	ISO 8015
			Promitání	
Materiál PDM-H	Polotovár $\phi 56 \times 32$	Hmotnost 0,034 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE Institute of Manufacturing Technology	Druh dokumentu <b>VÝKRES SOUČÁSTI</b>	Název <b>PASTOREK</b>		
	Kreslil VONDRA TOMÁŠ			
	Schválil			
	Datum vydání 29. 04. 2015	Číslo dokumentu <b>VUT-FSI-BP-01</b>		
			List 1/2	

# PŘÍLOHA 4

## Výrobní výkres kola



Vnější čelní modul	$m_e$	2	
Počet zubů	$z$	50	
Normální základní profil	-	ČSN ISO 677	
Uhel sklonu boční křivky zubu	$\beta_m$	$0^\circ$	
Uhel záběru	$\alpha_t$	$20^\circ$	
Smysl sfoupu boční křivky zubu	-	-	
Jednotkové posunutí radiální	$x$	0	
Jednotkové posunutí tangenciální	$x_c$	0	
Stupeň přesnosti podle	-	ISO 17485	
Kontrolované mezní úchytky	dvoubokého odvalu za ořážku	$F_i''$	-
	dvoubokého odvalu za rozteč	$f_i''$	-
	sklonu zubu	$F_{\beta}$	-
Kontrolní rozměr	tloušťky zubů na konst. řetivě	$S_{te}$	-
	výšky hlavy zubů	$h_{te}$	-
Spoluzabírající kolo	číslo výkresu	$x$	VUT-FSI-BP-01
	počet zubů	$z$	25
	úhel os	$\Sigma$	$90^\circ$
Sřední normální modul	$m_{mn}$	1,75	
Počet zubů základního virt. kola	$z_v$	111,80	
Průměr základní kružnice	$d_{\phi}$	210,12	
Uhel roztečného kužele	$\delta$	$63^\circ 26' 6''$	
Uhel patního kužele	$\delta_i$	$61^\circ 2' 39''$	
Uhel hlavy	$\theta_a$	$2^\circ 2' 57''$	
Uhel paty	$\theta_i$	$2^\circ 23' 27''$	

Struktura povrchu: $\sqrt{Ra 3.2}$	Hrany: $\perp 0,3$	Měřítko 2:1	Přesnost ISO 2768-mK
			Tolerování ISO 8015
			Promítání $\ominus$
Materiál PDM-H	Polotovary $\phi 110 \times 33$	Hmotnost 0,127 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
 ÚSTV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE VUT Institute of Manufacturing Technology	Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI	Název KOLO	
	Kreslil VONDRA TOMÁŠ		
	Schválil	Číslo dokumentu VUT-FSI-BP-02	
Datum vydání 29. 04. 2015		List 2/2	

## PŘÍLOHA 5 (1/2)

Kalkulace pastorku a kola

Rychlá cenová nabídka								
<b>Součást:</b>	<b>Pastorek č.v.VUT-FSI-BP-01</b>							
<b>Počet kusů:</b>	<b>1</b>							
<b>Materiál:</b>	Polotovár				Cena mat:		Hrubá:	
Ertacetal H	Průměr	55		32	31,6	Kč/ks	0,11	kg/ks
<b>Operace</b>	<b>Čas přípravy min</b>		<b>Čas strojní min</b>		<b>Cena Kč</b>			
Řezat	10		2,7		88,9			
Soustružit - konvenční					0			
Soustružit CNC-čas dle Shopturn S840D	120		7,94		1535,28			
Obrážet drážku	20		4,3		170,1			
Vrtat, závity, frézovat, drážky-NC					0			
Ozubení	120		14,72		943,04			
Začištění			2,37		16,59			
Brus díra					0			
Brus kulato					0			
Brus plocho					0			
Broušení ozubení(OBP, šnekovka)					0			
Broušení ozubení Niles tř.6-7					0			
Broušení ozubení Niles tř.5					0			
Broušení ozubení Niles tř.4					0			
<b>Tepelné a chemicko-tepelné zpracování</b>			<b>Cca hmotnost Kg</b>		<b>Cena Kč</b>			
Zušlechťení					0			
Kalení					0			
Nitridace					0			
Černění					0			
Zinek					0			
<b>Cena za 1 ks bez DPH</b>			<b>2786</b>		<b>Kč</b>			
<b>Cena za 1 ks bez DPH</b>			<b>102,41</b>		<b>EUR</b>			

**BONDY S.R.O.**  
ING. RADOSLAV ČIKÁNEK  
MOBIL: 731 507 761  
MAIL: CIKANEK@BONDY.CZ

## PŘÍLOHA 5 (2/2)

Kalkulace pastorku a kola

Rychlá cenová nabídka									
Součást:	Kolo č.v.VUT-FSI-BP-02								
Počet kusů:	1								
Materiál:	Polotovár				Cena mat:		Hrubá:		
Ertacetal H	Průměr	110		33	130,3	Kč/ks	0,44	kg/ks	
Operace	Čas přípravy min			Čas strojní min		Cena Kč			
Řezat	10			5,5		108,5			
Soustružit - konvenční						0			
Soustružit CNC-čas dle Shopturn S840D	120			14,82		1617,84			
Obrážet drážku	20			12,6		228,2			
Vrtat, závit, frézovat, drážky-NC						0			
Ozubení	120			29,45		1046,15			
Začištění				4,75		33,25			
Brus díra						0			
Brus kulato						0			
Brus plocho						0			
Broušení ozubení(OBP, šnekovka)						0			
Broušení ozubení Niles tř.6-7						0			
Broušení ozubení Niles tř.5						0			
Broušení ozubení Niles tř.4						0			
Tepelné a chemicko-tepelné zpracování				Cca hmotnost Kg		Cena Kč			
Zušlechťení						0			
Kalení						0			
Nitridace						0			
Černění						0			
Zinek						0			
<b>Cena za 1 ks bez DPH</b>				<b>3164</b>		<b>Kč</b>			
<b>Cena za 1 ks bez DPH</b>				<b>116,33</b>		<b>EUR</b>			

BONDY S.R.O.  
ING. RADOŠLAV ČIKÁNEK  
MOBIL: 731 507 751  
MAIL: ČIKÁNEK@BONDY.CZ



## PŘÍLOHA 6

Cenová nabídka firmy Bondy, s. r. o.



**BONDY**  
s. r. o.  
KOVOBRÁBĚNÍ, VÝROBA OZUBENÍ

**PROVOZOVNA :**

**BONDY, s.r.o.**  
**Komenského 591**  
**664 42 Modřice**

Tel. : + 420 547 216 062  
FAX : + 420 547 216 560  
[www.bondy.cz](http://www.bondy.cz)  
e-mail [bondy@bondy.cz](mailto:bondy@bondy.cz)  
Bank.spojení ČSOB 203668 / 0300 (CZK)  
Bank.spojení ČSOB 107775084 / 0300 (EUR)

Firma BONDY je zapsána v Obchodním rejstříku u Krajského soudu v Brně , oddíl C , vložka 6702

**Veškerý písemný a telefonní styk uskutečňujte pouze s provozovnou !!!**

**K rukám p.Tomáše Vondry, VUT FSI Brno**

**K poptávce č. osobně 27/04/2015**

### **Cenová nabídka číslo 30/04/2015**

Dobrý den, na základě Vaší poptávky Vám posílám cenový návrh na Vámi poptané dílce. **Cena je za kompletní zhotovení dle dodané dokumentace včetně dodávky materiálu.**

**1.Kuželový pastorek č.v.VUT-FSI-BP-01**

1 ks á 2 786 Kč  
2 ks á 1 541 Kč/ks  
5 ks á 794 Kč/ks  
10 ks á 545 Kč/ks  
20 ks á 420 Kč/ks  
50 ks á 345 Kč/ks  
80 ks á 327 Kč/ks  
100 ks á 320 Kč/ks

**2.Kuželové kolo č.v.VUT-FSI-BP-02**

1 ks á 3 164 Kč  
2 ks á 1 919 Kč/ks  
5 ks á 1 172 Kč/ks  
10 ks á 923 Kč/ks  
20 ks á 799 Kč/ks  
50 ks á 724 Kč/ks  
80 ks á 705 Kč/ks  
100 ks á 699 Kč/ks

Termín:

- 4 týdny od závazné objednávky

### **Na objednávce uvádějte číslo nabídky.**

Výše uvedené ceny platí jen při objednání všech poptávaných kusů a jsou bez DPH. Platby do 20 000 Kč musí být uskutečněny v hotovosti při převzetí zboží nebo předem-zálohovou fakturou. Zboží nelze vydat, pokud jsou starší faktury po splatnosti. Splatnost faktur 30 dní. Pokud nabídka obsahuje i termín, je tento vždy s výhradou meziprodeje kapacity.  
**Platnost nabídky-30 dní.**

V Modřicích dne 30.04.2015

**BONDY S.R.O.**  
**ING. RADOŠLAV ČIKÁNEK**  
MOBIL: 731 507 751  
MAIL: [CIKANEK@BONDY.CZ](mailto:cikanek@bondy.cz)

**BONDY S.R.O.**  
PROVOZOVNA KOMENSKÉHO 591  
MODŘICE 664 42  
DIČ CZ46965290  
TEL. 547216062 \* 547216552

Ing.Radoslav Cikánek  
Fa.Bondy s.r.o.  
Tel.547 216 552  
Mob.731 507 751  
Fax.547 216 560  
Email : [cikanek@bondy.cz](mailto:cikanek@bondy.cz)

## PŘÍLOHA 7

Cenová nabídka firmy ultimat3D s. r. o.

Nabídka vydaná

Číslo nabídky: 15050201

Ze dne: 02.05.2015

**ultimat 3D**

print centrum

**Firma:** ultimat3D s.r.o. **Zpracoval:** Lukáš Jablončík **E-mail:** jabloncik@3dprintcentrum.cz

**Ulice:** **Město:** Brno **Tel.:** +420 728 530 581

**PSČ:**

**Zákazník:** Tomáš Vondra

**PSČ:**

**Ulice:**

**Město:** Brno

**Kontakt:** Tomáš Vondra

**Tel.:** +420 731 254 045

**E-mail:** tomasvondra@hotmail.cz

### PARAMETRY

**Materiál:**  ABS  PLA

**Tloušťka vrstvy:**  0,05  0,10  0,15

0,20  0,25  0,30

0,35

### VÝROBEK

Č. výrobku	Název výrobku	Soubor
1	kolo	Kolo.stl
2	pastorek	Pastorek.stl

### CENA (bez DPH)

Č. výrobku	Počet kusů	Cena za kus	Cena za zakázku
1	1	700,00 Kč	700,00 Kč
1	20	680,00 Kč	13 600,00 Kč
1	100	650,00 Kč	65 000,00 Kč
2	1	200,00 Kč	200,00 Kč
2	20	190,00 Kč	3 800,00 Kč
2	100	180,00 Kč	18 000,00 Kč

### DOPRAVA

Doprava: dle domluvy

Termín dodání: 10.5.2015

Platnost nabídky: 2 měsíce