



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Návrh programu pro výpočet kuželového
soukolí**

**The Draft Program for the Calculation of the
Bevel Gear**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

Šárka LAXOVÁ

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Petr Karel, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Laxová** Jméno: **Šárka** Osobní číslo: **457568**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh programu pro výpočet kuželového soukolí

Název bakalářské práce anglicky:

The Draft Program for the Calculation of the Bevel Gear

Pokyny pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je návrh programu (MS Excel) pro výpočet kuželového soukolí. Práce bude obsahovat rešerši druhů ozubených kol, způsobu výroby a způsobu ustavení kuželových kol. V práci bude proveden rozbor výpočtu kuželových soukolí dle normy ISO 10300. Součástí práce bude praktická ukázka návrhu kuželového soukolí. Rozsah grafické části: program; výrobní výkresy navrženého soukolí, tedy pastorku a kola.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.
- [2] Joseph E. Shigley: Konstruování strojních součástí. 2010. ISBN 978-80-214-2629-0
- [3] FREDERICK E. GIESECKE. Technical Drawing with Engineering Graphics. 2014. ISBN 13: 9781292026183.
- [4] Normy ISO 10300-(1,2,3) - anglicky
- [5] Katalogy výrobců

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Karel Petr, Ph.D., ústav konstruování a částí strojů FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **12.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Karel Petr, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Vojtěch Dymovský, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, Dr.Sc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

20.4.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Návrh programu pro výpočet kuželového soukolí** vypracovala samostatně s použitím pramenů a literatury uvedené v seznamu.

V Praze dne 24. 7. 2018

.....

Podpis

Anotační list

Jméno autora:	Šárka Laxová
Název BP:	Návrh programu pro výpočet kuželového soukolí
Anglický název:	The Draft Program for the Calculation of the Bevel Gear
Rok:	2018
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Karel Petr, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran 48 počet obrázků 42 počet tabulek 6 počet příloh 3
Klíčová slova:	kuželová ozubená kola, přímé ozubení, šikmé ozubení, zakřivené ozubení, Microsoft Excel, Gleason, Klingelberg, Oerlikon
Keywords:	bevel gears, straight bevel gears, skew bevel gears, spiral bevel gears, Microsoft Excel, Gleason, Klingelberg, Oerlikon
Anotace:	Tato práce se především zabývá vytvořením nástroje pro výpočet Kuželového soukolí v programu Microsoft Excel. Účelem tohoto nástroje je rychlé a informativní zjištění geometrických hodnot a parametrů tohoto soukolí. V teoretické části se práce zabývá řešením druhů ozubených kol, základní geometrií, základními a pevnostními výpočty, materiály a výrobou kuželových kol.
Abstract:	This thesis is primarily concerned with the creation of a tool for calculating the Bevel gears in Microsoft Excel. The purpose of this tool is to quickly and informally determine the geometric values and parameters of this gear. The theoretical part deals with the research of gears, geometry, basic and strength calculations, materials and production of Bevel gears.

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala panu Ing. Karlu Petrovi, Ph.D., za cenné rady, připomínky a věnovaný čas při vypracování bakalářské práce

Obsah

ÚVOD.....	1
1. TEORETICKÁ ČÁST	2
1.1 Základní teorie a rozměry kuželového soukolí	3
1.2 Základní dělení kuželových kol	5
1.3 Geometrie kuželových kol	9
1.4 Základní vztahy pro výpočet kuželových kol	10
1.5 Silové poměry na kuželových kolech	13
1.6 Záběr zubů.....	16
1.7 Materiály ozubených kol.....	17
1.8 Pevnostní výpočty	20
1.8.1 Součinitelé pro pevnostní výpočty.....	20
1.8.2 Pevnostní výpočet na ohyb	28
1.8.3 Pevnostní výpočet na dotyk	29
1.9 Výroba kuželových kol	29
1.9.1 Výroba přímých a šikmých zubů	29
1.9.2 Výroba zakřivených zubů	33
1.9.3 Ustavení kuželových kol.....	36
2. PRAKTICKÁ ČÁST	38
2.1 Funkce a popis programu	38
2.2 Ověření správnosti hodnot	39
ZÁVĚR	43
SEZNAM ZDROJŮ.....	44
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	46
SEZNAM TABULEK	47
SEZNAM PŘÍLOH.....	48

ÚVOD

Nejvýznamnějším a nejrozšířenějším druhem převodových mechanismů jsou ozubené převody. Principem je přenos krouticího momentu pomocí tlakových sil spoluzabírajících členů – dvojicí ozubených kol. Tato dvojice skládající se z hnacího a hnaného kola, kdež menší se označuje jako pastorek a větší jako kolo, spolu tvoří takzvané soukolí.

Ozubená kola můžeme rozdělit na 4 typy a to na: čelní kola, kuželová kola, šroubová kola a kola šneková. Hlavním tématem této bakalářské práce budou právě již zmíněná kuželová kola a kuželová soukolí. Bez kuželových soukolí by se dnešní doba neobešla. Využití přenosu mechanické energie v různoběžných osách hřídelů můžeme nalézt například v automobilových diferenciálech, vrtačkách ale třeba i v helikoptérách. Tato práce se bude zabírat teorií kuželových kol obsahující jejich typy, druhy, způsoby výroby, materiály a také ustavením těchto kol. Velká část práce bude rovněž věnována výpočtům geometrických hodnot, silových poměrů a výpočtům pevnostním, rozšířených o popis a definici součinitelů, které rozebírá norma ISO 10 300 a její tři díly.

Hlavním cílem bude vytvoření programu v prostředí Microsoft Excel. Takový program bude po zadání vstupních veličin schopen předběžně navrhnout normálový modul, dle kterého se pak obsluha rozhodne pro normalizovaný modul, který bude použit ve výpočtech. S tímto vypočteným modulem bude poté program schopen vypočítat všechny hlavní geometrické parametry, a hlavně výpočty a veličiny pro pevnostní kontrolu. Výsledkem posléze bude samostatný list přímo určený k vytisknutí, na kterém bude obsluha informována o nejdůležitějších parametrech geometrie, silových poměrech, koeficientech, a především zda vypočtené ozubení vyhovuje kontrole na ohyb a dotyk.

V závěru práce bude zhodnocení splnění cílů, a hlavně funkce programu. Hodnoty vypočtené mnou vytvořeným programem budou porovnány s hodnotami vypočtenými generátorem kuželových kol v programu Autodesk Inventor.

1. TEORETICKÁ ČÁST

Ozubené převody jsou nejrozsáhlejším převodovým mechanismem využívaným k přenosu energie a krouticího momentu. Samotná ozubená kola můžeme dělit na 4 základní typy a to na:

- Čelní ozubená kola

Jsou ze všech typů ozubených kol nejjednodušší. Umožňují převod mezi paralelními hřídeli. Ozubený věnec má po obvodu souměrně rozmístěné zuby, které mohou mít buďto přímý, šikmý nebo šípový tvar. Oproti ostatním typům se nejnaději vyrábí a výroba není ani tak drahá, jelikož není potřeba speciálních strojů jako je například potřeba u kuželových kol. Nevýhodou je poměrná hlučnost související se záběrem a tvarem ozubení.

- Šneková kola

Slouží k přenosu energie mezi mimoběžnými hřídeli. Dokáží přenášet velké výkony a dosáhnout velkých převodových poměrů. Soukolí na rozdíl od předešlého typu tvoří šnek a kolo. Výhodou je libovolný úhel mezi osami a tichost soukolí. Nevýhodou je složitost jejich výroby a nutnost je účinně mazat, poněvadž u nich vznikají velká tření.

- Šroubová kola

Využívají značně zakřivené zuby. Určena jsou pro nízké převodové poměry a rychlosti. Jsou obtížná na výrobu a je nutné je účinně mazat kvůli zahřívání.

- Kuželová kola

Teorií kuželových kol se zabývá zbytek práce.

Podle kinetických poměrů je dále dělíme na valivá soukolí (čelní a kuželová kola) a šroubová soukolí (šneková a šroubová kola). [1,2,3]

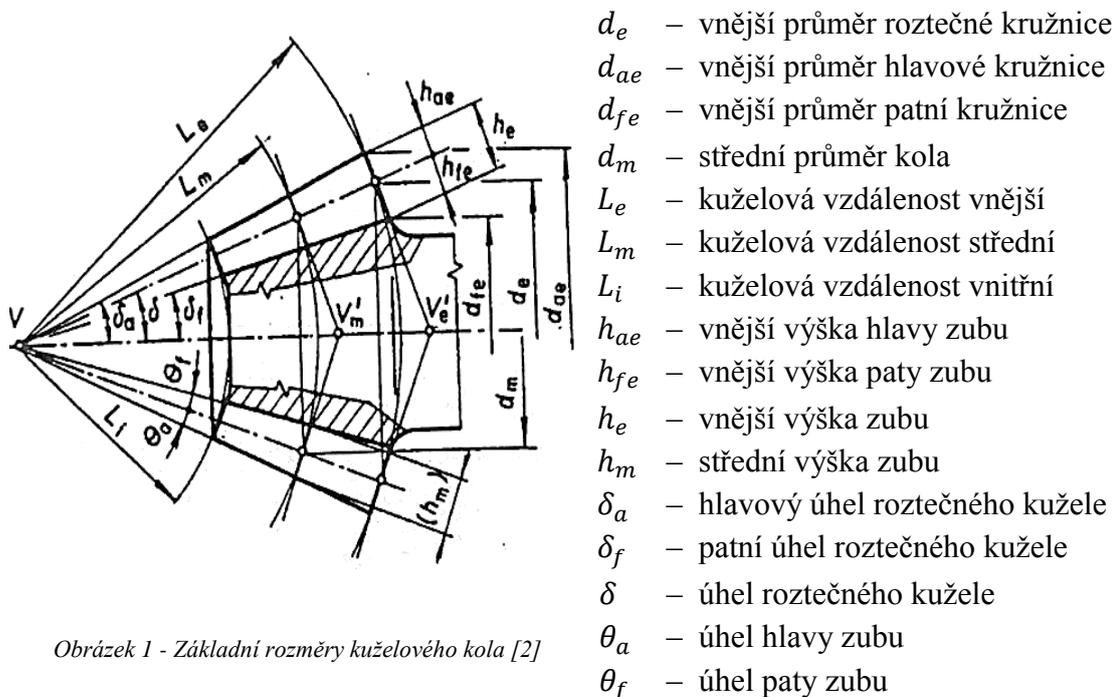
1.1 Základní teorie a rozměry kuželového soukolí

Účelem kuželového soukolí je přenesení mechanické energie mezi různoběžnými hřídeli – nejčastěji sobě kolmých os, tedy úhlu os $\Sigma = 90^\circ$ nebo také mezi mimoběžnými hřídeli, tzv. hypoidní soukolí. Patří mezi valivá soukolí, kde se boky zubů po sobě odvalují. Lze je nalézt ve velkém množství konstrukčních variant a vyznačují se mnohotvárností ozubení. [3]

Samotné kuželové kolo se skládá z těla a ozubeného věnce, jehož zuby jsou pravidelně rozmístěny po obvodu a jsou vymezeny hlavovým a patním kuželem. Ozubení může být vnější i vnitřní.

Pro výrobu kuželových kol jsou potřeba speciální stroje a nástroje. Kvůli nutnosti sledovat a kontrolovat mimo délkových úchylek i úchylky úhlové, jsou kuželová kola v porovnání s válcovými koly náročnější na výrobu a také na montáž. [2,4]

Geometrické rozměry a veličiny kuželového soukolí jsou indexovány dle toho, zda jde o rozměr hnacího kola (značené indexem 1) nebo kola hnaného (index 2), dále dle toho, jestli je rozměr na vnitřním průměru kola (index i), na vnějším průměru kola (index e) nebo na středním průměru kola (index m). Parametry ve středním příčném řezu jsou využívány pro pevnostní kontrolu ozubení. Na výkresech ozubených kol jsou zase kvůli snazší možnosti kontroly a měření nejčastěji uváděny hodnoty ve vnějším čelním řezu. [2]



Obrázek 1 - Základní rozměry kuželového kola [2]

U některých geometrických prvků rozlišujeme, zda jde o hodnoty normálové (index n) nebo hodnoty tečné (index t). Tento index má význam hlavně u prvků jako jsou modul, rozteč, tloušťka zubu a šířka zubové mezery. Hodnoty tečné jsou měřené po obvodu valivých kružnic a hodnoty normálové v řezech kolmých na průběh zubu či mezery. [2]

Dalšími parametry ozubení jsou úhel sklonu zubů β , který se v průběhu křivky mění a často využívaný tečný úhel profilu α_t , jenž je ve všech válcových řezech stejný a je s úhly profilu rovinného kola α_{nm} a α_{ne} spojen vztahy (1.1). Pro kola s přímým ozubením ($\beta_m = 0^\circ$) platí $\alpha = \alpha_t = \alpha_{nm}$.

$$\operatorname{tg} \alpha_t = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{nm}}{\cos \beta_m} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{ne}}{\cos \beta_e} \quad 1.1$$

Základním údajem určujícím „jemnost“, popř. „hrubost“ ozubení kol je modul m . Je vybírán podle výkonu, který musí dané soukolí přenášet a jeho velikosti jsou stanoveny normou. Rozlišujeme modul tečný (vnější m_{te} a střední m_{tm}) a modul normálový (vnější m_{ne} a střední m_{nm}). K výpočtu výrobních a kontrolních rozměrů jsou potřeba moduly m_{nm} a m_{te} .

Výše vypsané moduly jsou vázány vztahy:

$$\frac{m_{nm}}{m_{tm}} = \cos \beta_m \quad 1.2$$

$$\frac{m_{ne}}{m_{te}} = \cos \beta_e \quad 1.3$$

$$\frac{m_{tm}}{m_{te}} = \frac{L_m}{L_e} = 1 - 0,5\psi_L \quad 1.4$$

$$m_{te} = \frac{m_{nm}}{(1-0,5\psi_L) \cdot \cos \beta_m} \quad 1.5$$

Pro ozubení přímé ($\beta_m = 0^\circ$) platí $m_{te} = m_{ne} = m_e$, $m_{nm} = m_{tm} = m_m$ a vztah mezi nimi je tedy obdobně [2]:

$$m_e = \frac{m_m}{(1-0,5\psi_L)} \quad 1.6$$

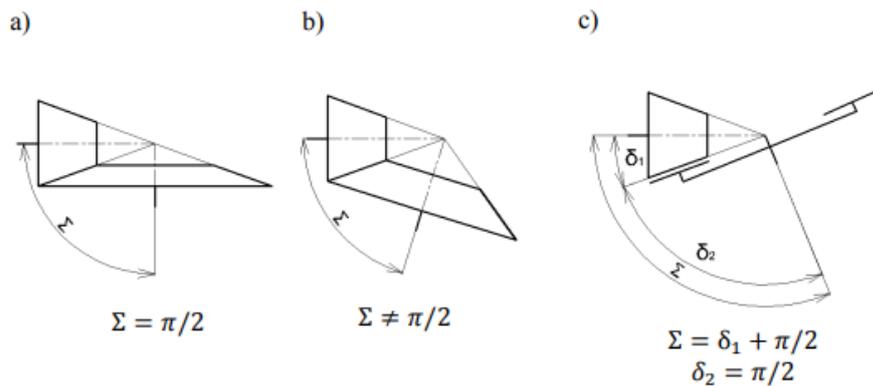
- kde: m_{te} – vnější tečný modul
 m_{ne} – vnější normálový modul
 m_{tm} – střední tečný modul
 m_{nm} – střední normálový modul
 m_e – vnější modul
 m_m – střední modul

1.2 Základní dělení kuželových kol

Kuželová kola dělíme:

Dle velikosti úhlů mezi osami hřídelů:

- Pravoúhlé soukolí (obr. 2a)
- Kosoúhlé soukolí (obr. 2b)
- Základní soukolí s rovinným kolem (obr. 2c)



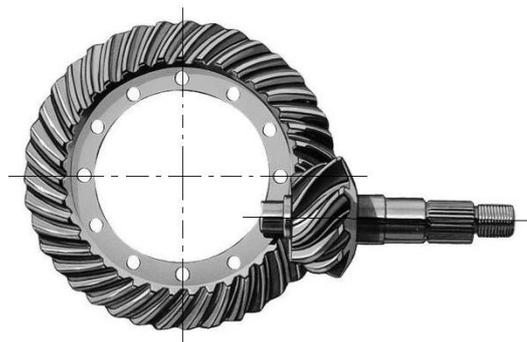
Obrázek 2 - Dělení kuželového soukolí dle velikosti úhlů mezi osami hřídelů: a) pravoúhlé soukolí, b) kosoúhlé soukolí, c) soukolí základní s rovinným kolem [5]

Dle vzájemné polohy os:

- Klasická – osy různoběžné
- Hypoidní – osy mimoběžné



Obrázek 3 - Kuželové soukolí s osami různoběžnými [6]



Obrázek 4 - Kuželové soukolí s osami mimoběžnými [7]

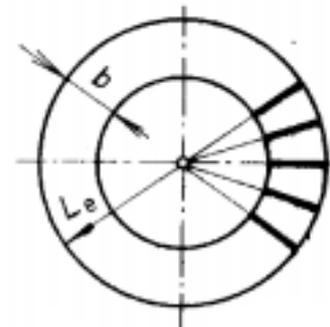
Dle smyslu zakřivení zubů:

- Pravý – při pohledu od vrcholu se zuby stáčejí ve směru otáčení hodinových ručiček
- Levý – při pohledu od vrcholu se zuby stáčí proti směru otáčení hodinových ručiček

Dle zakřivení zubů, zuby:

- Přímé

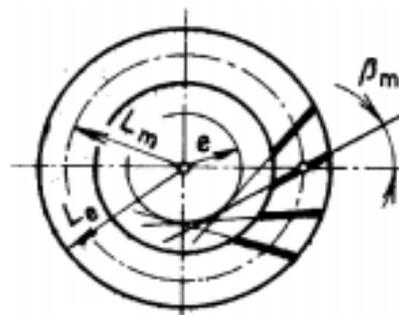
Jsou nejjednodušším typem kuželových kol. Jejich ozubený věnec je obvykle tvaru I (viz. kapitola 1.3). Tvar zuby se mění podél povrchové přímky kužele a tím se i modul směrem od vrcholu kužele lineárně zvětšuje.



Obrázek 5 - Kolo s přímými zuby [2]

Využívají se pro méně náročné převody a pro nižší obvodové rychlosti ($v = 2 \div 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Nevýhodou kuželových kol s přímými zuby je jejich malá únosnost. Také zde velkou citlivostí na výrobní nepřesnosti a deformace hrozí hranový záběr, jímž dochází k neklidnému chodu, snížení životnosti a hlučnosti. Řídící křivkou je přímka, která prochází středem kola. [2,8]

- Šikmé



Obrázek 6 - Kolo s šikmými zuby [2]

Kuželová kola s šikmým ozubením jsou na rozdíl od kol s přímým ozubením vhodná pro větší převodové poměry, zatížení a rychlosti. Jsou méně citlivá na výrobní nepřesnosti a deformace, a jsou klidnější a tišší v chodu. Řídící křivkou je přímka,

kteřá se dotýká pomocné kružnice o poloměru e (excentricita). [2,8]

- Zakřivené

Obecně kuželová kola se zakřivenými zuby mají stejně jako kuželová kola se šikmými zuby větší únosnost a díky rovnoměrnému přenášení rotačního pohybu a delšímu trvání záběru jsou klidnější v chodu. Nevýhodou je však nutné použití drahých strojů a nástrojů na jejich výrobu. [2,8]

Dále je můžeme dělit na zuby:

- Kruhové – metoda Gleason (obr. 7a)

Řídící křivkou zubů je kružnice se středem na pomocné kružnici. Úhel sklonu β_m je nejčastěji 35° .

- Kruhové – metoda Gleason – Zerol (obr. 7b)

Zvláštním případem kuželových kol s kruhovými zuby je ozubení Zerol, jenž má úhel sklonu β_m roven 0° .

- Paloidní – metoda Klingelnberg (obr. 7c)

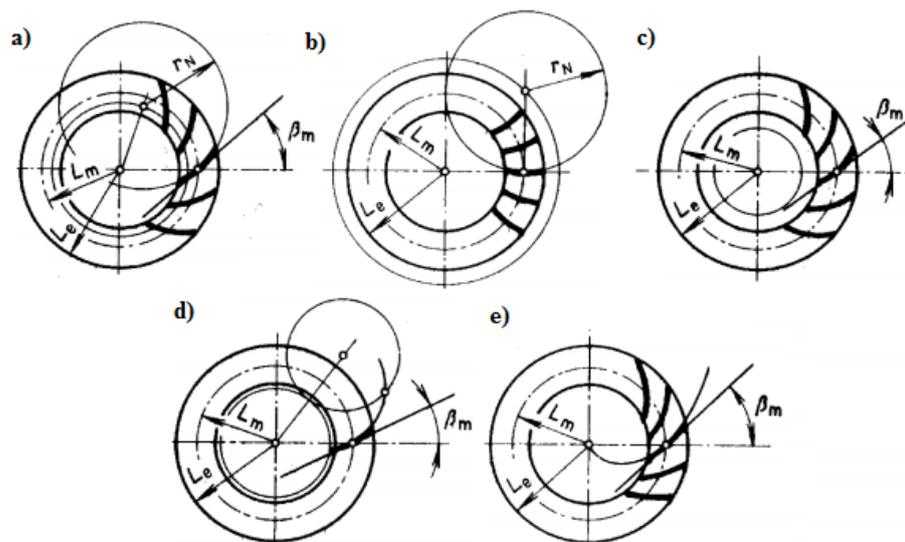
Řídící křivkou je prodloužená evolventa neboli paloida.

- Eloidní – metoda Oerlikon (obr. 7d)

Řídící křivkou je část prodloužené epicykloidy.

- Spirální (obr. 7e)

Křivkou zubu je Archimédova nebo logaritmická spirála.



Obrázek 7 - Rozdělení kuželových kol podle zakřivení [2]

Kuželová kola s a) kruhovými zuby, b) Zerol, c) paloidními zuby, d) eloidními zuby, e) spirálními zuby

Následující tabulka 1 zjednodušeně zobrazuje proměnlivost výšky zubu a jmenovité rozměry pro všechny řídicí křivky zubů.

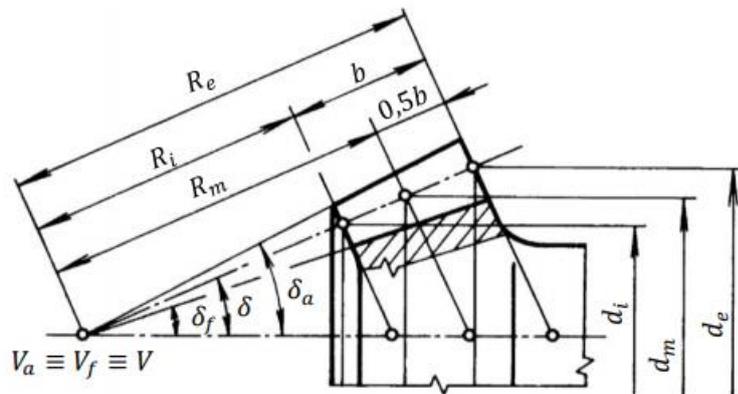
Tabulka 1 – Jmenovité rozměry kuželových kol dle řídicí křivky zubu [9]

Řídicí křivka	Název	Výška zubu	Jmenovité rozměry
Radiální přímka	přímé ozubení	proměnlivá	m_{et} (normalizovaný), $\alpha_t = 20^\circ, 15^\circ, 14,5^\circ, 17,5^\circ; \beta = \beta_m = 0^\circ$
Šikmá přímka	šikmé ozubení		m_{et} (normalizovaný), $\alpha_t = 20^\circ, 15^\circ, 14,5^\circ, 17,5^\circ;$ $\beta = \beta_m = 20^\circ \div 40^\circ$ (odstupňováno po 5°)
Kruhový oblouk	Gleason	proměnlivá, ale hlavové, patní a roztečné kužele nemají společný vrchol	m_{mn} (normalizovaný), $\alpha_{mn} = 20^\circ, 17,5^\circ, 14,5^\circ;$ $\beta_m = 30 \div 45^\circ$, nejčastěji $\beta_m = 35^\circ$
	Gleason - Zerol		m_{mn} (normalizovaný), $\alpha_{mn} = 20^\circ, 17,5^\circ, 14,5^\circ; \beta_m = 0^\circ$
	Modul - Kurvex	m_{mn} (normalizovaný), $\alpha_{mn} = 20^\circ, 17,5^\circ, 14,5^\circ; \beta_m = 25 \div 45^\circ$	
Evolventa (paloida)	paloidní ozubení KlingelInberg	konstantní	m_{mn} (normalizovaný), $\alpha_{mn} = 20^\circ$ nebo $17,5^\circ; \beta_m = 30 \div 38^\circ$
Epicykloida	eloidní ozubení Oerlikon – Spiromatic		m_{mn} (normalizovaný), $\alpha_{mn} = 17,5^\circ; \beta_m = 30 \div 50^\circ$
	cyklopaloidní ozubení KlingelInberg		m_{mn} (normalizovaný), $\alpha_{mn} = 20^\circ$ nebo $17,5^\circ; \beta_m = 0 \div 45^\circ$

1.3 Geometrie kuželových kol

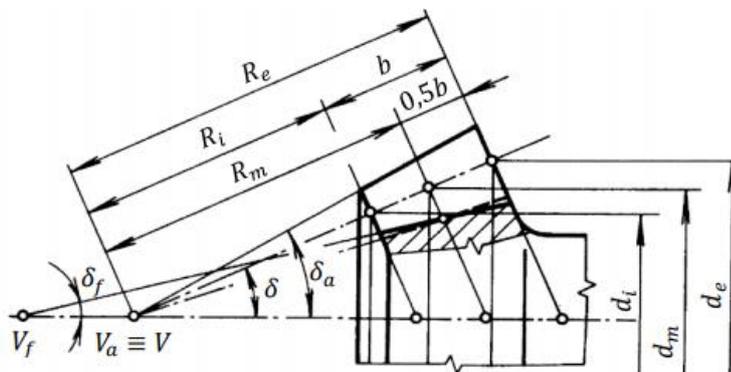
Geometrický základ kuželového kola tvoří komolý kužel, který je vymezený na kuželové roztečné ploše dvěma příčnými řezy. Plochy hlavového a patního kužele, které radiálně vymezují ozubený věnec kol, jsou určeny polovičními vrcholovými úhly, tj. úhlem hlavového kužele δ_a a úhlem kužele patního δ_f . [2] Dle jejich polohy vůči roztečnému kuželu můžeme kuželová kola dělit na základní 3 tvary věnce:

- Tvar I – S hlavovou a patní kuželovou plochou ve společném vrcholu, tj. $V_a = V_f = V$. Rozměry zubů lineárně narůstají se vzdáleností od vrcholu. $h \neq konst.$



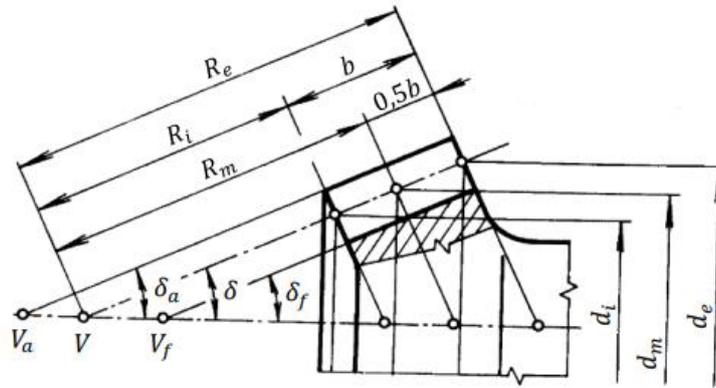
Obrázek 8 - Tvar věnce I [2]

- Tvar II – S posunutým vrcholem patního kužele tak, aby šířka zubové mezery byla konstantní a tloušťka zubu na roztečném kuželi narůstala úměrně se vzdáleností od vrcholu. $V_a = V_f \neq V$.



Obrázek 9 - Tvar věnce II [2]

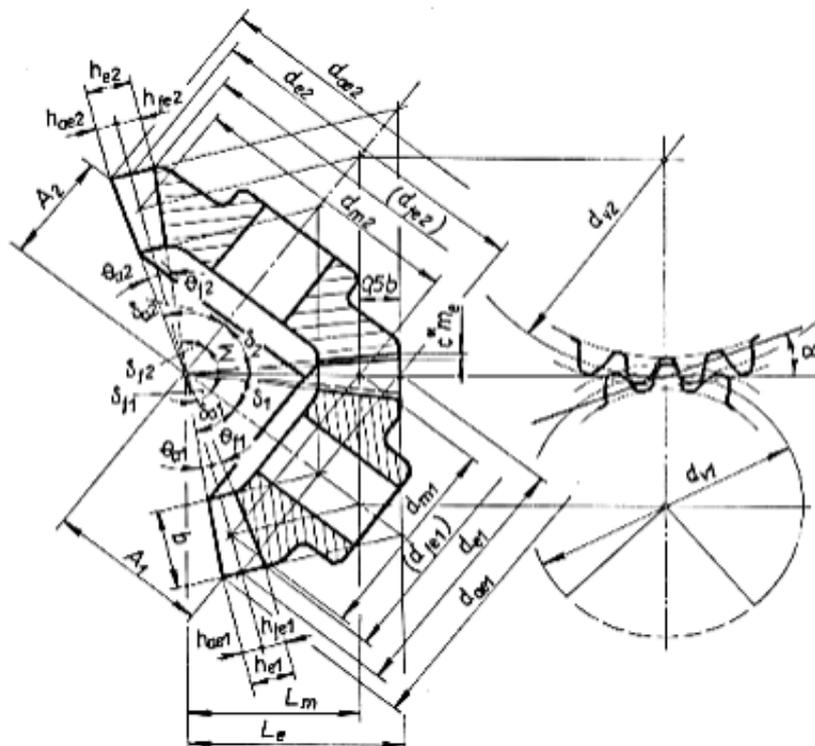
- Tvar III – S konstantní výškou zubů, kde površky všech kuželů v osovém řezu jsou rovnoběžné, tj. $\delta_a = \delta_f = \delta$. Používán u kol paloidních, eloidních a u kol se zuby kruhově zakřivenými. $V_a \neq V_f \neq V, h = konst.$



Obrázek 10 - Tvar věnce III [2]

1.4 Základní vztahy pro výpočet kuželových kol

Výpočty pro geometrii kuželových kol se řídí normou DIN 3971. Níže uvedené základní vztahy pro rozměry a vzdálenosti (viz. obr. 11) platí pro soukolí s korekcemi VN, typu I, se zuby přímými, šikmými a kruhovými. Pro soukolí s korekcemi N je třeba dosadit $x = x_\tau = 0$, pro soukolí se zuby přímými dosazujeme $\beta_m = 0$ a $m_{te} = m_{ne} = m_e$. [2,9,10]



Obrázek 11 - Základní geometrické prvky pastorku a kola typu I

Převodové číslo

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{\sin \delta_2}{\sin \delta_1} \quad 1.7$$

Úhel stoupání

$$\delta_1 = \arctg \left(\frac{\sin \Sigma}{u + \cos \Sigma} \right) \cdot \delta_2 \quad 1.8$$

$$\delta_2 = \Sigma - \delta_1 \quad 1.9$$

Pro úhly roztečného kužele při úhlu mezi osami $\Sigma = 90^\circ$ platí:

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{1}{u}; \operatorname{tg} \delta_2 = u \quad 1.10$$

Kuželová vzdálenost vnější

$$L_e = 0,5m_{te} \cdot z_c = 0,5m_{te}\sqrt{z_1^2 + z_2^2} \quad 1.11$$

Kuželová vzdálenost střední

$$L_m = L_e - 0,5b = L_e(1 - 0,5\psi_L) \quad 1.12$$

Šířka věnce

$$b = \psi_L \cdot L_e \quad 1.13$$

Průměry roztečné

$$d_{e1} = m_{te} \cdot z_1 \quad 1.14$$

$$d_{e2} = m_{te} \cdot z_2 \quad 1.15$$

Výška hlavy zubu

$$h_{ae1} = (h_a^* + x)m_{te} \quad 1.16$$

$$h_{ae2} = (h_a^* - x)m_{te} \quad 1.17$$

Výška paty zubu

$$h_{fe1} = (h_a^* + c^* - x)m_{te} \quad 1.18$$

$$h_{fe2} = (h_a^* + c^* + x)m_{te} \quad 1.19$$

Výška zubu

$$h_{e1} = h_{e2} = (2h_a^* + c^*)m_{te} \quad 1.20$$

Průměry hlavových kružnic

$$d_{a1} = m_{te}[z_1 + 2 \cdot (h_a^* + x) \cdot \cos \delta_1] \quad 1.21$$

$$d_{a2} = m_{te}[z_2 + 2 \cdot (h_a^* - x) \cdot \cos \delta_2] \quad 1.22$$

Průměry patních kružnic

$$d_{f1} = m_{te}[z_1 - 2 \cdot (h_a^* + c^* - x) \cdot \cos \delta_1] \quad 1.23$$

$$d_{f2} = m_{te}[z_2 - 2 \cdot (h_a^* + c^* + x) \cdot \cos \delta_2] \quad 1.24$$

Tloušťka zubu a šířka mezery

$$s_{e1} = m_{te}(0,5\pi + 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha_t + x_\tau) = e_{e2} \quad 1.25$$

$$s_{e2} = m_{te}(0,5\pi - 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha_t - x_\tau) = e_{e1} \quad 1.26$$

Výška hlavového kužele

$$A_1 = L_e \cdot \cos \delta_1 - h_{ae1} \cdot \sin \delta_1 \quad 1.27$$

$$A_2 = L_e \cdot \cos \delta_2 - h_{ae2} \cdot \sin \delta_2 \quad 1.28$$

Úhel hlavy zubu

$$\operatorname{tg} \theta_{a1} = \frac{h_{ae1}}{L_e} \quad 1.29$$

$$\operatorname{tg} \theta_{a2} = \frac{h_{ae2}}{L_e} \quad 1.30$$

Úhel paty zubu

$$\operatorname{tg} \theta_{f1} = \frac{h_{fe1}}{L_e} \quad 1.31$$

$$\operatorname{tg} \theta_{f2} = \frac{h_{fe2}}{L_e} \quad 1.32$$

Úhel hlavového kužele

$$\delta_{a1} = \delta_1 + \theta_{a1} \quad 1.33$$

$$\delta_{a2} = \delta_2 + \theta_{a2} \quad 1.34$$

Úhel patního kužele

$$\delta_{f1} = \delta_1 - \theta_{f1} \quad 1.35$$

$$\delta_{f2} = \delta_2 - \theta_{f2} \quad 1.36$$

Roztečný průměr porovnávacího kola

$$d_{v1} = \frac{d_{m1}}{\cos \delta_1} = \frac{d_{e1} \cdot (1 - 0,5\psi_L)}{\cos \delta_1} \quad 1.37$$

$$d_{v2} = \frac{d_{m2}}{\cos \delta_2} = \frac{d_{e2} \cdot (1 - 0,5\psi_L)}{\cos \delta_2} \quad 1.38$$

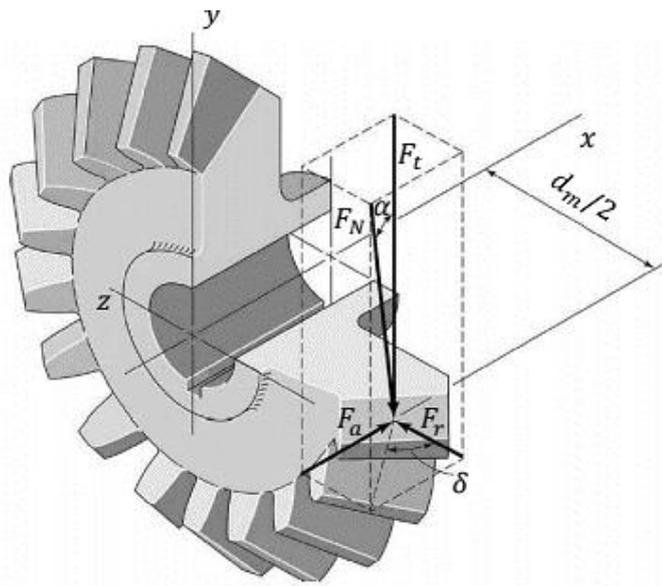
Počet zubů porovnávacího kola

$$z_{v1} = \frac{d_{v1}}{m_m} = \frac{z_1}{\cos \delta_1} \quad 1.39$$

$$z_{v2} = \frac{d_{v2}}{m_m} = \frac{z_2}{\cos \delta_2} \quad 1.40$$

1.5 Silové poměry na kuželových kolech

Při záběru soukolí dochází k přenosu krouticího momentu M_k z hnacího kola na kolo hnané. V místě styku zubů vzniká zatížením normálová síla F_N , která se rozkládá do tří vzájemně kolmých složek – síly axiální F_a , síly radiální F_r , a síly tečné F_t . „Působíště této normálové síly F_N se klade do středního příčného řezu na pólovou povrchu“ [2]. Vztahy pro složky těchto sil budou odlišné pro přímé a nepřímé ozubení.

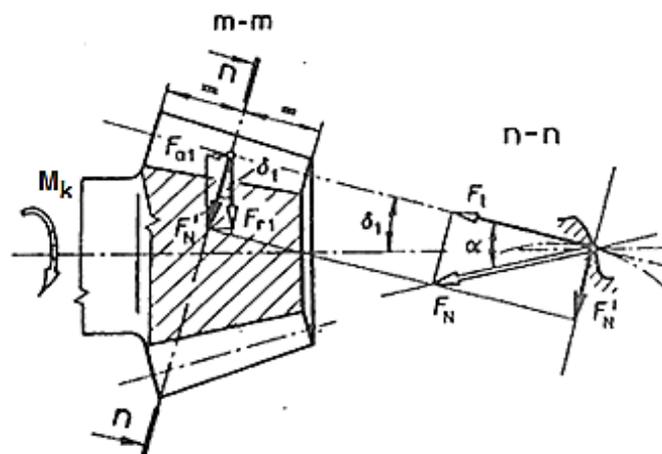


Obrázek 12 - Síly na kuželovém kole s přímými zuby [1]

F_N – normálová síla, F_t – tečná (obvodová) síla, F_a – axiální síla,
 F_r – radiální síla, d_m – střední roztečný průměr

- Silové poměry pro kola s přímými zuby

Cílem řešení silových poměrů u kol s přímými zuby je rozložení normálové síly F_N . Na obr. 13 je zobrazen tento rozklad silových poměrů u pastorku. Tečná síla F_t se vypočte z rovnice krouticího momentu M_k na rameni středního roztečného poloměru r_{m1} . Normálová síla F_N ve sklopeném normálovém řezu $n-n$ vystupuje ve skutečné velikosti a rozkládá se zde na tečnou sílu F_t a sílu $F_{N'}$, která se ve výchozí poloze rozloží na sílu radiální F_{r1} a axiální F_{a1} . [2]



Obrázek 13 – Silové poměry kola s přímými zuby [1]

$$F_t = \frac{M_k}{r_{m1}} = \frac{2M_k}{d_{m1}} \quad 1.41$$

$$F_N = \frac{F_t}{\cos \alpha} \quad 1.42$$

$$F_{N'} = F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad 1.43$$

Po dosazení získáme:

$$F_{r1} = F_{N'} \cdot \cos \delta_1 = F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \delta_1 \quad 1.44$$

$$F_{a1} = F_{N'} \cdot \sin \delta_1 = F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \delta_1 \quad 1.45$$

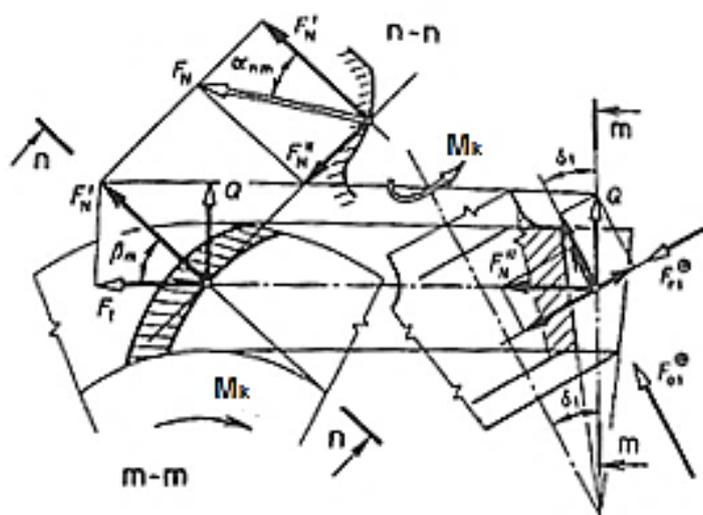
Pro $\Sigma = \delta_1 + \delta_2 = 90^\circ$ není nutné síly v normálovém řezu ($F_N, F_t, F_{N'}$) rozlišovat, stačí tedy vyřešit jen silové poměry jednoho členu, povětšinou pastorku. [2] Platí:

$$F_{r1} = F_{a2} \quad 1.46$$

$$F_{a1} = F_{r2} \quad 1.47$$

- Silové poměry pro kola s nepřímými zuby

Pro nepřímé zuby opět normálovou silou F_N rozložíme do jejich tří složek (obr. 14). Působíště F_N je znovu kladeno ve středním příčném řezu na pólové pvršce a její skutečnou velikost je možné vidět ve sklopeném normálovém řezu $n-n$, kde se rozkládá na $F_{N'}$ a $F_{N''}$; síla $F_{N'}$ se dále v řezu $m-m$ dělí na sílu tečnou F_t a sílu Q . V osovém řezu jsou pak uplatněny síly $F_{N''}$ a Q , které se nahrazují složkami do směru radiální a axiálního. Složky síly F_r jsou kladné, jestliže působí dostředivě a složky síly F_a se obecně považují za kladné, když vytlačují kolo ze záběru. [2]



Obrázek 14 - Silové poměry kola s nepřímými zuby [2]

$$F_t = \frac{M_k}{r_{m1}} = \frac{2M_k}{d_{m1}} \quad 1.48$$

$$F_{N'} = \frac{F_t}{\cos \beta_m} \quad 1.49$$

$$Q = F_{N'} \cdot \sin \beta_m = F_t \cdot \operatorname{tg} \beta_m \quad 1.50$$

$$F_N = \frac{F_{N'}}{\cos \alpha_{nm}} = \frac{F_t}{\cos \beta_m \cdot \cos \alpha_{nm}} \quad 1.51$$

$$F_{N''} = F_{N'} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{nm} = \frac{F_t}{\cos \beta_m} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{nm} \quad 1.52$$

Po dosazení získáme:

$$F_{r1} = F_{N''} \cdot \cos \delta_1 \mp Q \cdot \sin \delta_1 = \frac{F_t}{\cos \beta_m} \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{nm} \cdot \cos \delta_1 \mp \sin \beta_m \cdot \sin \delta_1) \quad 1.53$$

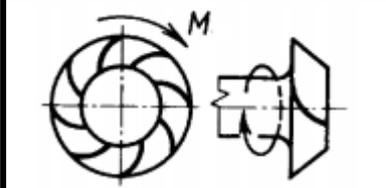
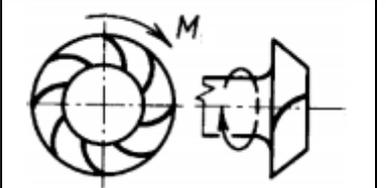
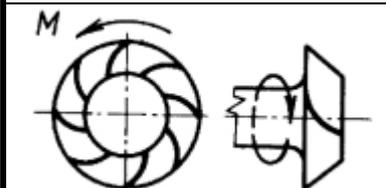
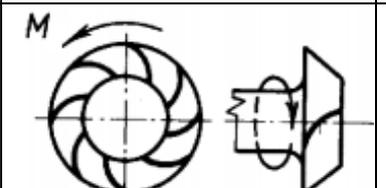
$$F_{a1} = F_{N''} \cdot \sin \delta_1 = \frac{F_t}{\cos \beta_m} \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{nm} \cdot \sin \delta_1 \pm \sin \beta_m \cdot \cos \delta_1) \quad 1.54$$

Při záběru vydutým bokem platí znaménka horní, jestliže zub zabírá vypouklým bokem pak použijeme znaménka dolní. S volbou znaménka nám může pomoci tabulka 2. Pro $\Sigma = 90^\circ$ opět platí níže uvedené vztahy, takže se lze zaměřit jen na pastorek. [2]

$$F_{r1} = F_{a2} \quad 1.55$$

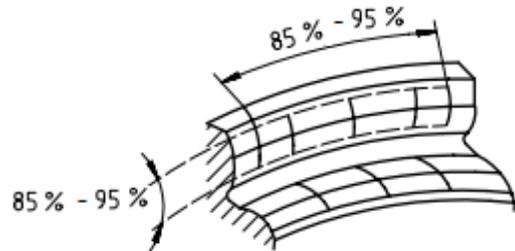
$$F_{a1} = F_{r2} \quad 1.56$$

Tabulka 2 - Závislost zakřivení zubů a směr momentu na axiální a radiální síle [2]

Směr stoupá zubů		Vztah pro	
pravý	levý	F_r	F_a
		-	+
		+	-

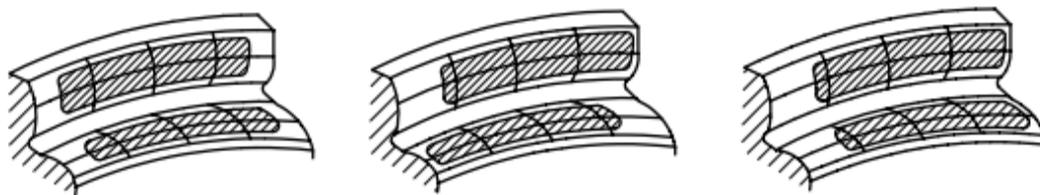
1.6 Záběr zubů

V praxi se kvůli požadavkům rovnoměrného zatížení zubů kontroluje a usiluje o to, aby byl záběr pouze na určité plošce boku zubu. Tato ploška se při zvětšování zatížení zvětšuje a mírně posouvá k silnějšímu konci zubu. [2] Kontrola pásma záběru se provádí na protáčecích zařízeních za pomoci barvy, která se nanese na jedno kolo a plynulým zatížením se obtiskne v záběrových místech kola druhého. Následně se kontrolují vytlačená místa dotyku zubů a vyhodnotí se, zda došlo k záběru na správném místě. Hodnotí se velikost, poloha a tvar obtisku. Výroba soukolí může začít, až pokud dojde k vyhovujícímu záběru. Po správném zaběhnutí přísluší určitému pastorku zcela určité kolo.

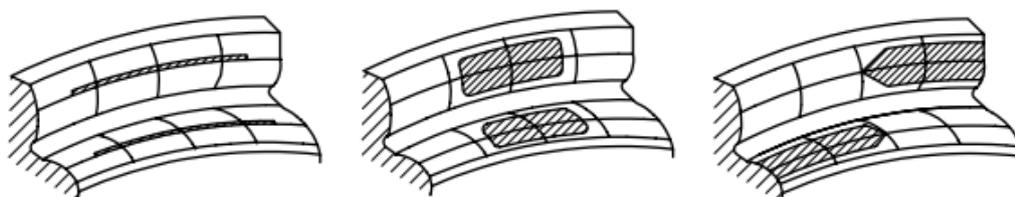


Obrázek 15 - Vyhovující plocha záběru [10]

Uspokojující ploška záběru je rovnoměrně rozložená a v šířce i výšce zubu se pohybuje v rozmezí 85% - 95% plochy zubu (obr. 15). Na obr. 16 a obr. 17 můžeme vidět příklady vyhovujících a nevyhovujících vzorů záběrů. [2, 10]



Obrázek 16 - Typické uspokojivé vzory záběrů [10]



Obrázek 17 - Neuspokojivé vzory záběrů [10]

Při výpočtech se uplatňuje teoretický součinitel záběru [2,10]:

$$\varepsilon_{\gamma} = \varepsilon_{\alpha} + \varepsilon_{\beta} \quad 1.57$$

kde: ε_{α} – součinitel záběru profilem

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\sqrt{d_{va1}^2 - d_{vb1}^2} + \sqrt{d_{va2}^2 - d_{vb2}^2} - 2 \cdot a_v \cdot \sin \alpha_t}{2\pi \cdot m_{tm} \cdot \cos \alpha_t} \quad 1.58$$

ε_{β} – součinitel záběru krokem

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{0,85 \cdot b \cdot \sin \beta_m}{\pi \cdot m_{nm}} \quad 1.59$$

1.7 Materiály ozubených kol

Nejčastějším materiálem pro výrobu kuželových kol je ocel, ale dají se využít i méně časté materiály jako je šedá litina, barevné kovy, kompozity nebo i plasty. Mechanické vlastnosti jádra a povrchová tvrdost oceli se dá vhodným tepelným, resp. chemicko-tepelným zpracováním vylepšit. Houževnaté jádro zajišťuje ozubenému kolu odolnost vůči křehkému lomu, jenž hrozí při rázech a vysoká pevnost v dotyku zase obstarává odolnost boků vůči opotřebení a zadírání. Pastorek by měl mít větší tvrdost, než má kolo.

Ocelová kola s tvrdostí $HB \leq 350$ se uplatňují při klidném zatížení kol malých a středních velikostí. Pro vylepšení vlastností se mohou normalizačně žíhat (normalizovat) nebo zušlechťovat. Výhodou je, že tepelné zpracování předchází

řezání zubů a přesnost vyřezaných zubů tedy není ohrožena případnými deformacemi, které mohou po tepelných procedurách vzniknout. Normalizováním docílíme vyrovnání mechanických vlastností a zlepšení obrobitelnosti u kol s obsahem uhlíku do 0,6 %C. Takto můžeme upravovat oceli konstrukční (11 500, 11 600, apod.) a ušlechtilé oceli uhlíkové 12 050 a 12060.

Ocelová kola s tvrdostí $HB > 350$ můžeme využít pro klidná i proměnná zatížení. Vysoké únosnosti je zde dosaženo volbou vhodné oceli ve spojení s vhodným druhem tepelného zpracování, jako je povrchové kalení, cementování, nitridování nebo i kombinace zmíněných procesů. Nevýhodou je, že tepelné zpracování je zařazeno až po vyřezání zubů a může dojít k jisté deformaci věnce. Na obnovu správných rozměrů a tvarů zubů se pak někdy musí zařadit nákladné procedury jako je broušení, lapování atp. Deformace vzniklé povrchovým kalením a nitridováním bývají však zanedbatelně malé a další úprava zubů není nutná. K povrchovému kalení jsou vhodné oceli uhlíkové a slitinové o středním obsahu uhlíku jako mají například oceli 12 060, 13 240, 14 240, a další. Pro cementování jsou využívány oceli uhlíkové a slitinové s nižším obsahem uhlíku (např. 14 220), a pro nitridování oceli s příměsí hliníku, chromu a vanadu (např. 14 340, 15 230).

Oceli na odlitky jsou využívány pro výrobu kol velkých rozměrů. Odlitá kola z oceli se obvykle normalizačně žíhají nebo zušlechťují. Zušlechťováním velkých a tvarově složitých kol hrozí nebezpečí vzniku vnitřních pnutí. Pro klidné zatížení kol je možné použít oceli 42 2631, 42 2651; pro větší zatížení třeba ocel 42 2661. Slitinové oceli pro vysoká zatížení proměnného charakteru (42 2720, 42 2750) umožňují i povrchové kalení zubů.

Šedá litina je používána pro ozubená kola větších rozměrů, která pracují při malých obvodových rychlostech a klidném zatížení, jelikož zuby litinového kola špatně snášejí rázy. Mají dobrou pevnost na dotyk a odolnost proti zadírání. V řadě případů je litina výhodnější náhradou za ocel na odlitky, neboť se lépe odlévá a je levnější. Používané litiny jsou například: pro malá zatížení 42 241 nebo 42 2424, pro střední zatížení pak legované litiny 42 2428, 42 2432 a 42 2435.

Barevné kovy jako *bronz a mosaz* se využívají především v kinematických převodech jemné mechaniky. Pro silové převody se ojediněle mohou použít v kombinaci např. s ocelovým kolem, kde pokryjí výrobní nepřesnosti a montáž.

[2,9,11]

Tabulka 3 - Nejčastěji využívané materiály na výrobu kuželových kol v ČR [9,11]

Zušlechťovací oceli			
EN značení	Číslo oceli	ČSN značka	Vlastnosti a příklady použití
C45E	1.1191	12 050	Obtížně svařitelná. Větší ozubená kola, šneky, klikové hřídele, spojovací součásti, ojnice, vřetena.
42CrMo4	1.7225	15 142	Pro velmi namáhané součásti strojů a silničních vozidel s velkou pevností a vyšší houževnatostí. Po žihání dobrá tvářitelnost za tepla a obrobitelnost. Ozubená kola, hřídele.
34CrNiMo6	1.6582	16 343	Žáropevná, pro vyšší teploty s velmi vysokou pevností a houževnatostí. Obtížná svařitelnost. Kompresorová a turbínová kola, hřídele.
Nitridační oceli			
31CrMoV9	1.8519	15 330	Výborná tvařitelnost, vysoká pevnost a houževnatost. Ozubená kola, písty, čepy, zalomené hřídele.
Cementační oceli			
16MnCr5	1.7131	14 220	Dobře obrobitelná, svařitelná a tvářitelná za tepla, po žihání i za studena. Vhodná k cementování s velkou pevností v jádře a tvrdou vrstvou. Hřídele, ozubená kola, zubové spojky, atp.
20MnCr5-4	1.7147	14 221	Dobrá obrobitelnost a tvárnost za tepla s vysokou pevností v jádře. Hřídele, větší ozubená kola, řetězová kola.
18CrNiMo7-6	1.6587	16 326	Tvrdá povrchová vrsta se zachováním houževnatého jádra. Velmi namáhané strojní součásti - velká ozubená kola, pastorky velkých převodovek.
18NiCr6	1.5810	16 220	Dobrá obrobitelnost a tvárnost za tepla. Velmi namáhané strojní součásti s tvrdým povrchem a houževnatým jádrem. Ozubená kola převodovek, diferenciálů.
15NiCr13	1.5752	16 420	Dobrá tvárnost za tepla, po žihání dobře obrobitelná. Velmi namáhané strojní součásti, hřídele, ozubená kola.

Plasty a kompozity mnohonásobně snižují výrobní náklady. Jsou lehčí než kovové materiály, odolné vůči korozi a dobře se zabíhají, protože nejsou tak citlivá na nepřesnosti výroby a montáže. Používají se spíše pro kinematické převody než pro silové. Např. polyamid, ertacetal, extolit, aj. [2]

1.8 Pevnostní výpočty

Vychází především z normy ISO 10 300. Níže uvedené pevnostní výpočty jsou primárně určeny pro výpočet přímého a šikmého ozubení, lze jej možné využít ale i pro ozubení různě zakřivené – zde je však nutno dbát na pokyny výrobce obráběcího zařízení. [10]

1.8.1 Součinitelé pro pevnostní výpočty

Norma ISO 10 300 a její tři díly se věnují také součinitelům pro tyto pevnostní výpočty. Berou v potaz různé vlivy působící na soukolí a upravují vypočtená napětí tak, aby co nejvíce odpovídala skutečnému zatížení tohoto soukolí. [2,10]

- Součinitelé přidavného zatížení

Při pevnostních výpočtech se používají součinitelé přidavného zatížení na ohyb K_F a na dotyk K_H . Tyto součinitele využíváme pro úpravu vypočtené síly F_N , resp. F_t na sílu co nejbližší provozní realitě. [2,10] Jsou dány vztahy:

$$K_F = K_A \cdot K_V \cdot K_{F\alpha} \cdot K_{F\beta} \quad 1.60$$

$$K_H = K_A \cdot K_V \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta} \quad 1.61$$

- Součinitel vnějších dynamických sil K_A

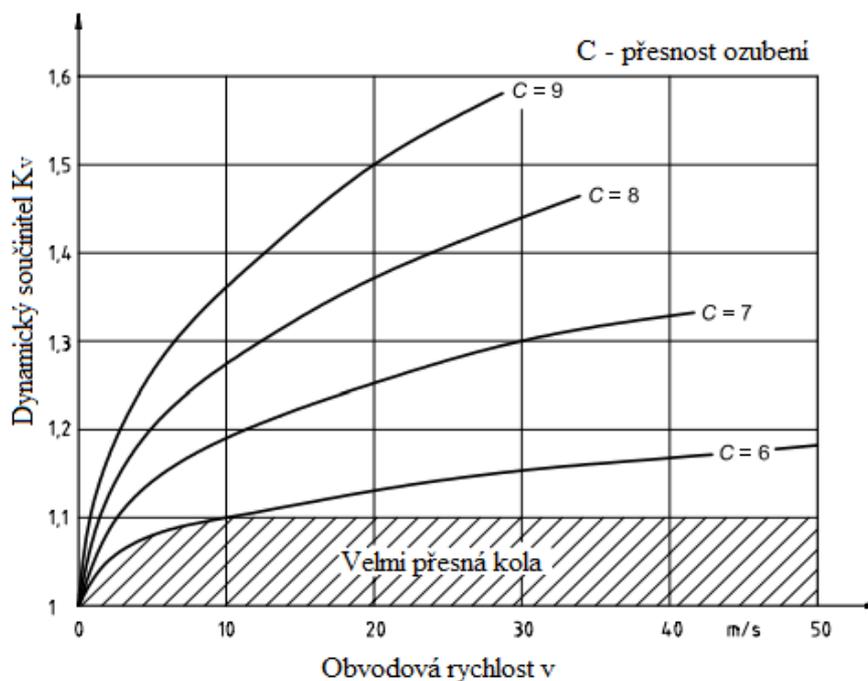
Uvažuje externí zatížení, která mají zdroj mimo ozubený převod jako jsou rázy při rozběhu nebo náhlém přetížení, nerovnoměrnost chodu atp. Je tedy závislý na provozních podmínkách a chodu soustrojí. Jeho přesná hodnota by se zjistila podrobnou analýzou celého systému. Empirické orientační hodnoty jsou uvedeny níže v tab. 4.

Tabulka 4 - Empirické hodnoty K_A : I – pohon elektromotorem/turbinou, II – pohon spalovacím motorem [2]

Chod soustrojí	Pracovní stroj	K_A	
		I	II
Rovnoměrný	Rotační kompresory a dmychadla, generátory, vrtačky, soustruhy atp.	1,0 ÷ 1,1	1,05 ÷ 1,2
Nerovnoměrný	Uhelné mlýny, zdvihací a transportní zařízení, jeřáby atp.	1,1 ÷ 1,3	1,2 ÷ 1,6
S rázy	Drtiče, pístová čerpadla, zemní stroje atp.	1,3 ÷ 1,7	1,4 ÷ 2,0

- Součinitel vnitřních dynamických sil K_V

Soustřeďuje se na vnitřní vibrace, mazací vlastnosti a tuhost rotujících prvků řešeného soukolí. Záleží na obvodové rychlosti kol a na druhu a přesnosti ozubení. Jeho skutečnou hodnotu opět lze zjistit jen podrobnou dynamickou analýzou soustrojí. Rychlé informativní zjištění součinitele K_V je možné určit z grafu na obr. 18.



Obrázek 18 - Závislost dynamického součinitele K_V na obvodové rychlosti [10]

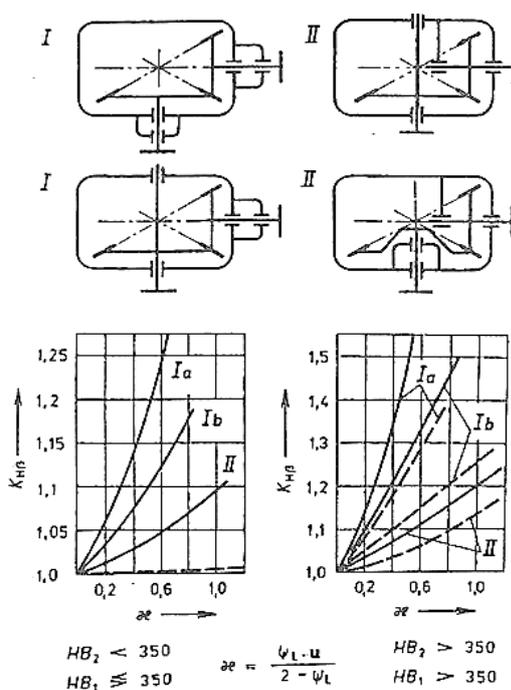
- Součinitelé nerovnoměrnosti zatížení zubů v záběrovém poli $K_{F\alpha}$ a $K_{H\alpha}$

Uvažují nerovnoměrnost zatížení zubů po obvodu kol. Pro kontrolu na ohyb a dotyk jsou různá. Záleží na tepelném a chemicko-tepelném zpracování kol (kvůli schopnosti záběhu), velikosti zatížení a druhu i přesnosti ozubení. Skutečná hodnota součinitelů vyžaduje podrobnou znalost výrobních úchylek, tuhostních charakteristik a dalších. Orientačně ho lze získat z tab. 5. [2,10]

Tabulka 5 - Součinitelé nerovnoměrnosti zatížení zubů v záběrovém poli $K_{F\alpha}$ a $K_{H\alpha}$ [10]

Stupeň přesnosti soukolí		6°	7°	8°	9°	10°	11°-12°	<5°
Povrchově kalená kola	Přímé ozubení	$K_{H\alpha}$	1,0		1,1	1,2	$\geq 1,2$	
		$K_{F\alpha}$	1,0		1,1	1,2	$\geq 1,2$	
	Nepřímé ozubení	$K_{H\alpha}$	1,0	1,1	1,2	1,4	$\geq 1,4$	
		$K_{F\alpha}$	1,0	1,1	1,2	1,4	$\geq 1,4$	
Kola bez povrchového kalení	Přímé ozubení	$K_{H\alpha}$	1,0		1,1	1,2	$\geq 1,2$	
		$K_{F\alpha}$	1,0		1,1	1,2	$\geq 1,2$	
	Nepřímé ozubení	$K_{H\alpha}$	1,0	1,1	1,2	1,4	$\geq 1,4$	
		$K_{F\alpha}$	1,0	1,1	1,2	1,4	$\geq 1,4$	

- Součinitelé nerovnoměrnosti zatížení $K_{F\beta}$ a $K_{H\beta}$

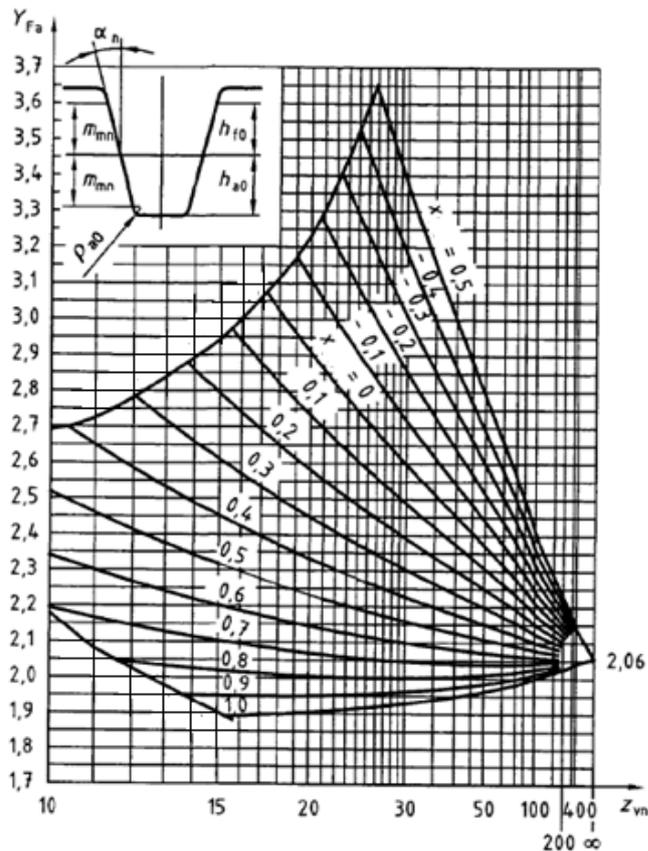


Sledují nerovnoměrnosti zatížení po šířce kola. Jsou různé pro kontrolu na dotyk a ohyb. Jsou soustředěny na průhyby hřídelů a s nimi souvisejícími úchylkami rovnoběžnosti dotkových čar u spoluzabírajících boků. Lze je určit z diagramů na obr. 19, kde křivky platí pro uložení hřídele v ložiskách: Ia – kuličkových, Ib – válečkových a kuželíkových. Možno přijmout $K_{H\beta} = K_{F\beta}$.

Obrázek 19 – Součinitel nerovnoměrnosti zatížení $K_{H\beta}$ [2]

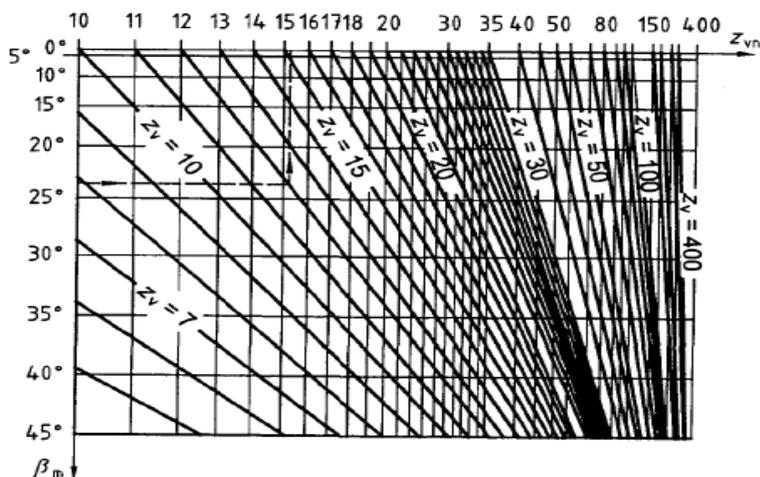
- Součinitel pro ohyb
 - Součinitel tvaru zubu Y_{Fa}

Záleží na korekci x a bivirtuálním (u přímého ozubení virtuálním) počtu zubů, jak je možno vidět v diagramu na obr. 20 níže.



Obrázek 20 – Součinitel tvaru zubu Y_{Fa} [10]

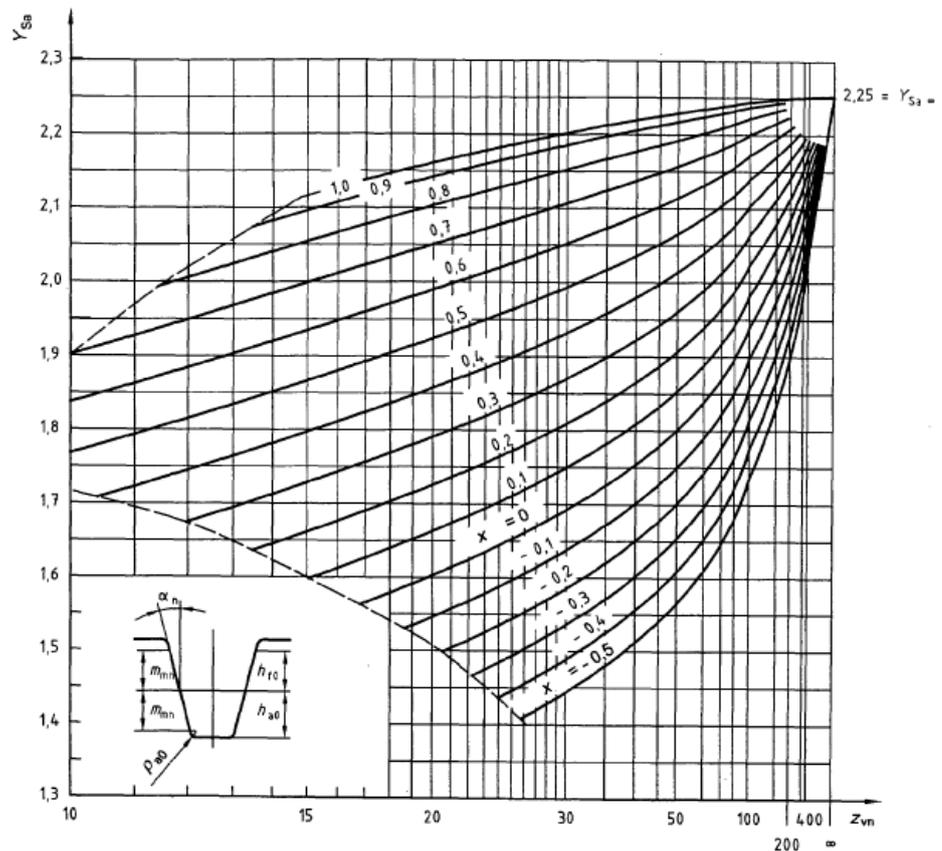
Pro převod virtuálního počtu zubu (kola s přímým ozubením) na bivirtuální počet zubů (kola s nepřímým ozubením) slouží graf na obr. 21. U kol s přímým ozubením je $z_v = z_{vn}$.



Obrázek 21 - Závislost počtu virtuálních zubů na úhlu záběru [10]

- Součinitel koncentrace napětí Y_{Sa}

Uvažuje konverzi jmenovitého ohybového namáhání při zatížení na špičce zubu k odpovídajícímu místnímu namáhání zubu. Je možné jej odečíst za pomoci korekce a virtuálního počtu zubů z diagramu na obr. 22.



Obrázek 22 - Součinitel koncentrace napětí Y_{Sa} [10]

- Součinitel vlivu záběru profilem Y_{ϵ}

Určen interpolačními vztahy podle velikosti součinitele záběru krokem ϵ_{β} za pomoci součinitele záběru profilem ϵ_{α} .

Pro $\epsilon_{\beta} = 0$

$$Y_{\epsilon} = 0,25 + \frac{0,75}{\epsilon_{\alpha}} \quad 1.62$$

Pro $0 < \epsilon_{\beta} \leq$

$$Y_{\epsilon} = 0,25 + \frac{0,75}{\epsilon_{\alpha}} - \epsilon_{\beta} \left(\frac{0,75}{\epsilon_{\alpha}} - 0,375 \right) \quad 1.63$$

Pro $\epsilon_{\beta} > 1$

$$Y_{\epsilon} = 0,625 \quad 1.64$$

- Součinitel sklonu zubu Y_{β}

Přibližně roven $Y_{\beta} = 1$.

- Součinitel charakteru cyklu Y_A

Je empiricky určen při míjivém zatížení na $Y_A = 1$, při namáhání souměrně střídavém na $Y_A = 0,7$ a při nepravidelné reverzaci z intervalu $Y_A = 0,75 - 0,85$.
- Součinitel technologie výroby Y_T

Zohledňuje konečnou úpravu povrchu zubů. Po kuličkování $Y_T = 1$, po válečkování $Y_T = 1,3 - 1,5$ a po broušení patního přechodu $Y_T = 0,7$.
- Součinitel vrubové citlivosti Y_δ

U ocelových kol objemově kalených a u kol ze šedé litiny je $Y_\delta = 1$; u kol, která jsou normalizačně žíhaná, zušlechtěná nebo povrchově kalená je $Y_\delta = 1,1 - 1,3$ a u ocelových kol, která jsou nitridovaná nebo cementovaná je $Y_\delta = 1,3 - 1,4$.
- Součinitel životnosti Y_N

Závisí na základním počtu zatěžovacích cyklů N_{Flim} , počtu cyklů odpovídajícím požadované životnosti soukolí N a exponentu Wöhlerovy křivky q_F .

$$Y_N = \sqrt[q_F]{\frac{N_{Flim}}{N}} = \sqrt[q_F]{\frac{N_{Flim}}{60 \cdot L_h \cdot n_{1,2}}} \quad 1.65$$

- Součinitel drsnosti povrchu Y_R

Přibližně je roven rozmezí $Y_R = 0,85 - 0,1$.
- Součinitel kuželového soukolí Y_K

Vzhledem k tomu, že pevnostní výpočty uvažují náhradu kuželových kol koly válcovými je třeba tuto korekci zohlednit ve výpočtech.

Empiricky je součinitel určen na $Y_K = 0,8$.
- Součinitel velikosti Y_X

Uplatňuje se až u relativně velkých kolech. Je dán empirickými vztahy dle velikosti, popř. dle modulu ozubení m . Např. pro $m < 5 \text{ mm}$ je $Y_X = 1$, pro $5 \leq m \leq 30$ je $Y_X = 1,05 - 0,01m$ a pro $m > 30 \text{ mm}$ je $Y_X = 0,75$.

- Součinitelé na dotyk

- Součinitel mechanických vlastností materiálu Z_E

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad 1.66$$

Při $E_1 = E_2 = E$ a $\mu_1 = \mu_2 = \mu$:

$$Z_E = \sqrt{\frac{E}{2\pi(1-\mu^2)}} \quad 1.67$$

U soukolí kuželových kol z oceli je součinitel mechanických vlastností roven $Z_E = 189,8 \sqrt{MPa}$.

- Součinitel délky dotyku Z_ε

Určen interpolačními vztahy podle velikosti součinitele záběru krokem ε_β za pomoci součinitele záběru profilem ε_α .

Pro $\varepsilon_\beta < 1$

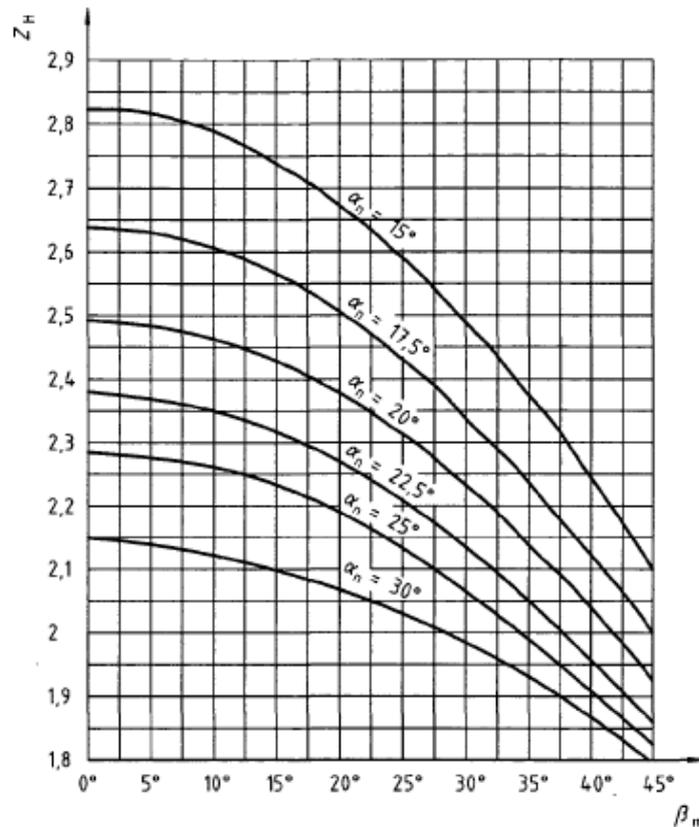
$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{4-\varepsilon_\alpha}{3}(1-\varepsilon_\beta) + \frac{\varepsilon_\beta}{\varepsilon_\alpha}} \quad 1.68$$

Pro $\varepsilon_\beta \geq 1$

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}} \quad 1.69$$

- Součinitel tvaru spoluzabírajících zubů Z_H

Zpracovává do výpočtů vliv křivosti oblouku boků ve směru profilu v bodě rozteče.

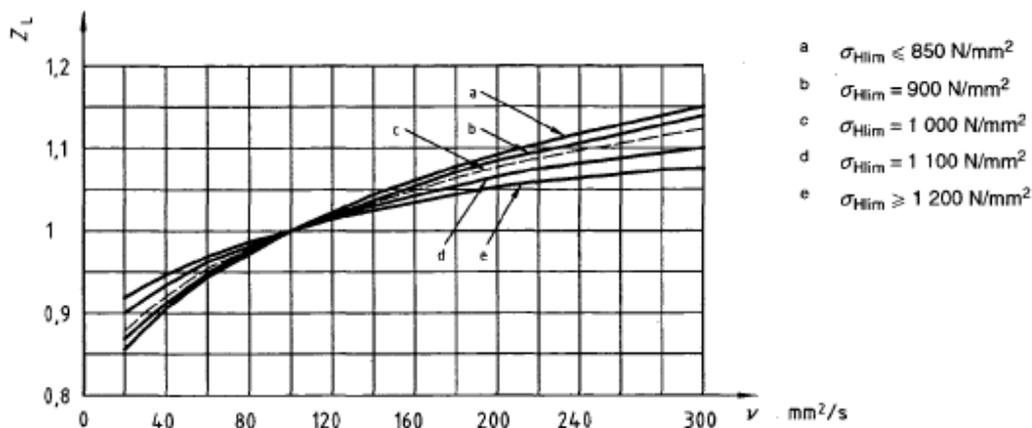


Obrázek 23 - Součinitel spoluzabírajících zubů Z_H [10]

○ Součinitel vlivu maziva Z_L

Je ovlivněn viskozitou maziva. Lze jej určit z diagramu (obr. 24) nebo přibližně vztahem:

$$Z_L = 0,6\sqrt[9]{\nu} \quad 1.70$$



Obrázek 24 - Součinitel vlivu maziva Z_L [10]

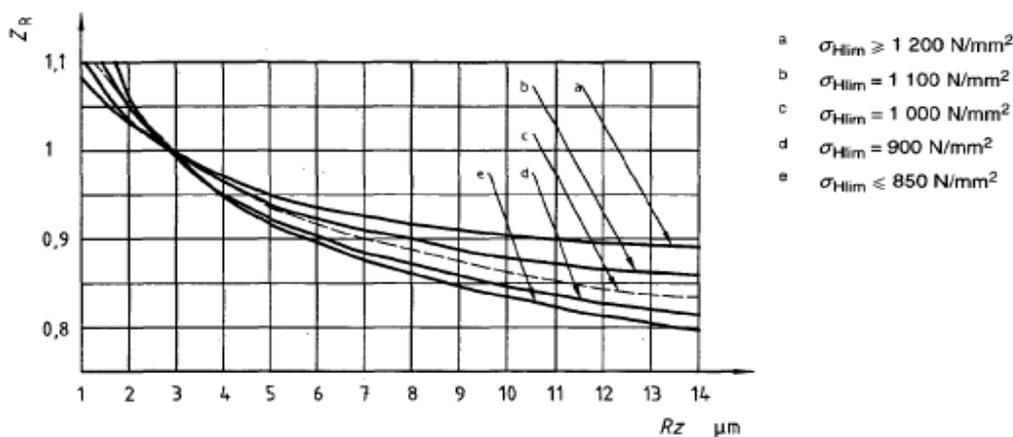
○ Součinitel životnosti Z_N

Závisí na základním počtu zatěžovacích cyklů N_{Hlim} , počtu cyklů odpovídajícím požadované životnosti soukolí N a exponentu Wöhlerovy křivky q_H .

$$Z_N = \sqrt[q_H]{\frac{N_{Hlim}}{N}} = \sqrt[q_H]{\frac{N_{Hlim}}{60 \cdot L_h \cdot n_{1,2}}} \quad 1.71$$

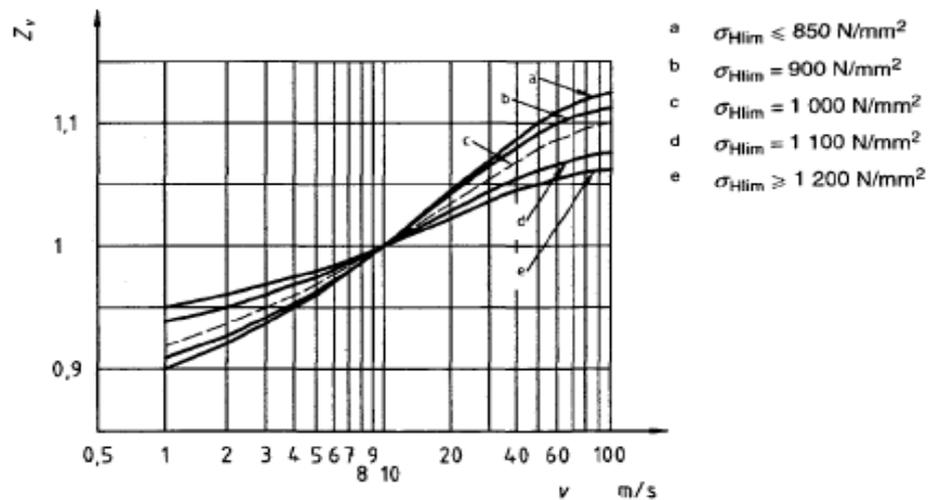
○ Součinitel vlivu jakosti povrchu Z_R

Stanoven podle drsnosti povrchu a meze únavy v ohybu z diagramu (obr. 25).



Obrázek 25 - Součinitel vlivu jakosti povrchu Z_R [10]

- Součinitel vlivu obvodové rychlosti Z_v
Součinitel se určí z diagramu (obr. 26) dle virtuálního počtu zubů, obvodové rychlosti a meze únavy v ohybu.



Obrázek 26 - Součinitel vlivu obvodové rychlosti Z_v [10]

- Součinitel sklonu zubu Z_β
Je podle normy určen empirickým vztahem, který dostatečně dobře odpovídá testům a praktickým zkušenostem pro aplikace na:

$$Z_\beta = \sqrt{\cos \beta_m} \quad 1.72$$

- Součinitel vlivu kuželového soukolí Z_K
Vzhledem k tomu, že pevnostní výpočty uvažují náhradu kuželových kol koly válcovými je třeba tuto korekci zohlednit ve výpočtech.
Empiricky je součinitel určen na $Z_K = 0,8$.
- Součinitel vlivu velikosti Z_X
Uplatňuje se až u relativně velkých kolech. Pro účely normy ISO 10 300 je součinitel určen na $Z_X = 1$.

1.8.2 Pevnostní výpočet na ohyb

Aby kuželového soukolí vyhovovalo pevnostnímu výpočtu na ohyb je nutné splnit podmínku:

$$S_F = \frac{\sigma_{Flim} \cdot Y_A \cdot Y_T \cdot Y_N \cdot Y_\delta \cdot Y_X \cdot Y_R}{Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\beta \cdot Y_\epsilon \cdot Y_K \cdot \frac{F_t \cdot K_F}{b \cdot m_{nm}}} \geq S_{Fmin} \quad 1.73$$

kde S_{Fmin} je minimální součinitel bezpečnosti na ohyb $S_{Fmin} = 1,3 \div 1,5$

1.8.3 Pevnostní výpočet na dotyk

Aby kuželového soukolí vyhovovalo pevnostnímu výpočtu na dotyk je nutné splnit podmínku:

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_X}{Z_E \cdot Z_H \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta \cdot Z_K \cdot \sqrt{\frac{F_t \cdot K_H \cdot u_v + 1}{b \cdot d_{m1} \cdot u_v}}} \geq S_{Hmin} \quad 1.74$$

kde S_{Hmin} je minimální součinitel bezpečnosti na dotyk $S_{Hmin} = 1,1 \div 1,2$

1.9 Výroba kuželových kol

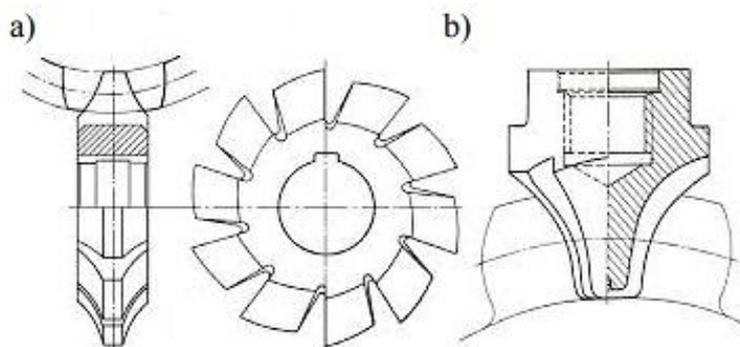
Ozubená kuželová kola lze vyrábět různými způsoby. Druhy výroby můžeme rozdělit dle tvaru zubů, které jsme schopni danou metodou vyrobit. Obecně lze vyrábět frézováním, obrážením, protahováním, ale také i moderními metodami jako je vstřikování, slinování (prášková metalurgie) nebo 3D tisk, kterými se tato práce nezabývá.

1.9.1 Výroba přímých a šikmých zubů

Níže jsou vypsány metody pro výrobu přímých a šikmých zubů.

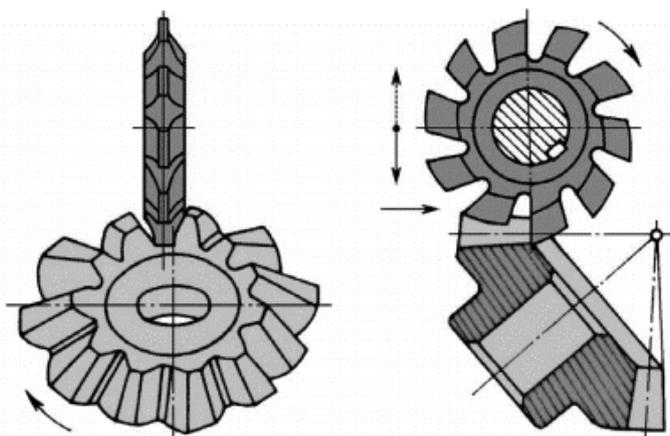
1.9.1.1 Frézování tvarovou frézou

Frézování tvarovou frézou patří mezi dělicí způsoby a provádí se na univerzálních frézkách s použitím čepové nebo kotoučové frézy. Využívá se pro ozubení větších modulů a lze jím vyrobit přímé i šikmé zuby. Nejprve se vyhrubuje střed zubové mezery, poté se kolo natočí a jednotlivě se vyfrézuje jeden bok strany zubu po druhém. [12,13]



Obrázek 27 - Modulové frézy: a) kotoučová, b) čepová [12]

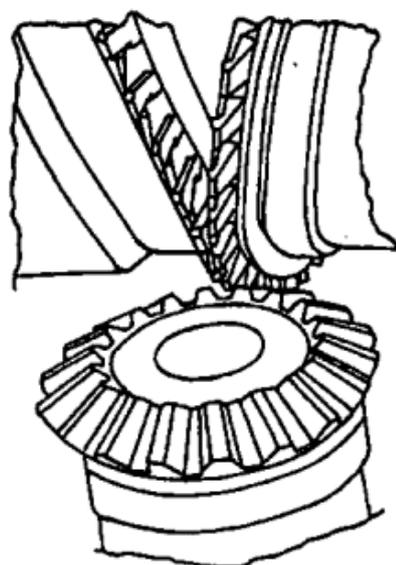
Tato metoda se často uplatňuje při hrubování kol před dokončením odvalovacími způsoby, jelikož není velmi přesná. Nástroj totiž není schopen lineárně zmenšovat svůj modul, takže teoreticky nejde vyrobít správné kuželové ozubení. [12,13]



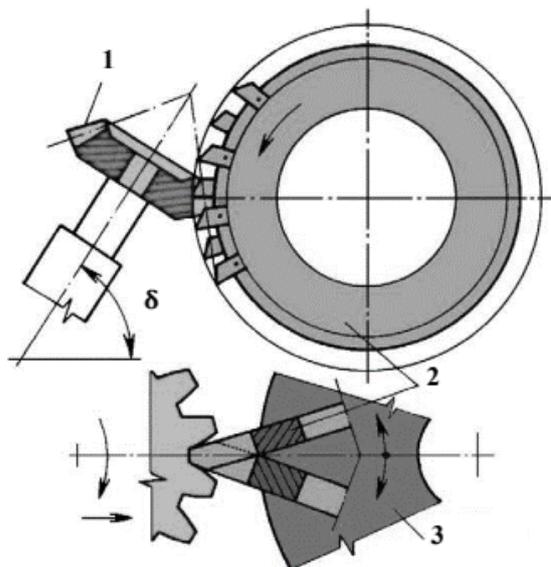
Obrázek 28 - Frézování tvarovou kotoučovou frézou [12]

1.9.1.2 Frézování nožovými hlavami

U této metody jsou k frézování použity dvě kotoučové - navzájem se v zubové mezeře překrývající - nožové hlavy (pravá a levá), v nichž jsou po obvodu vsazeny jednotlivé břity. Ozubení je vyráběno dělicím způsobem a používá se pro kola s příkými a šikmými zuby malých šířek. Zubová mezera je tvořena zapichováním a odvalováním. Při radiálním posuvu na hloubku zubu obráběného kola dochází k zapichování a kolébkou je zajištěno odvalování. [12,13]



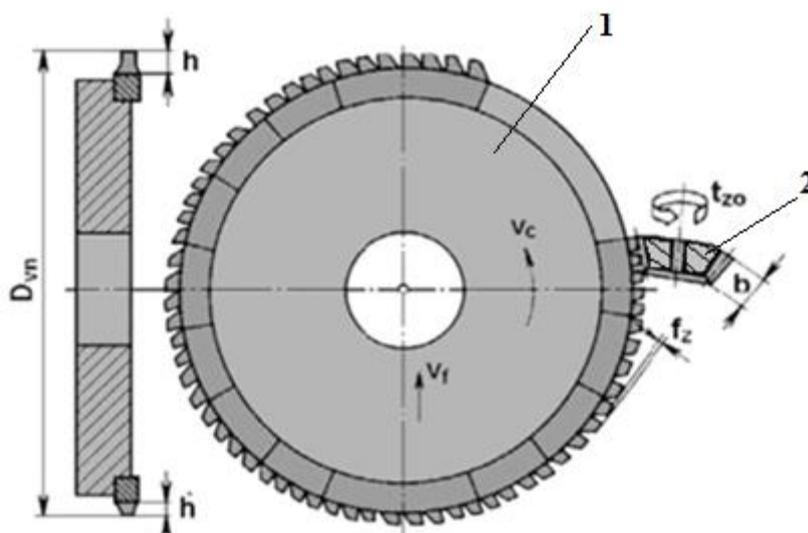
Obrázek 29 - Navzájem se překrývající nožové hlavy [14]



Obrázek 30 - Frézování nožovými hlavami: 1 - obráběné kolo, 2 - kotoučové frézy, 3 – kolébka [12]

1.9.1.3 Protahování

Protahování patří mezi dělicí způsoby výroby ozubení, kde nástrojem je kotoučový protahovák o průměru 450 až 600 mm. Touto metodou se dají produktivně vyrábět kuželová kola s přímými zuby v malosériové, ale především ve velkosériové výrobě.



Obrázek 31 - Protahování kuželových kol: 1 - kotoučový protahovák, 2 - protahované kolo [12]

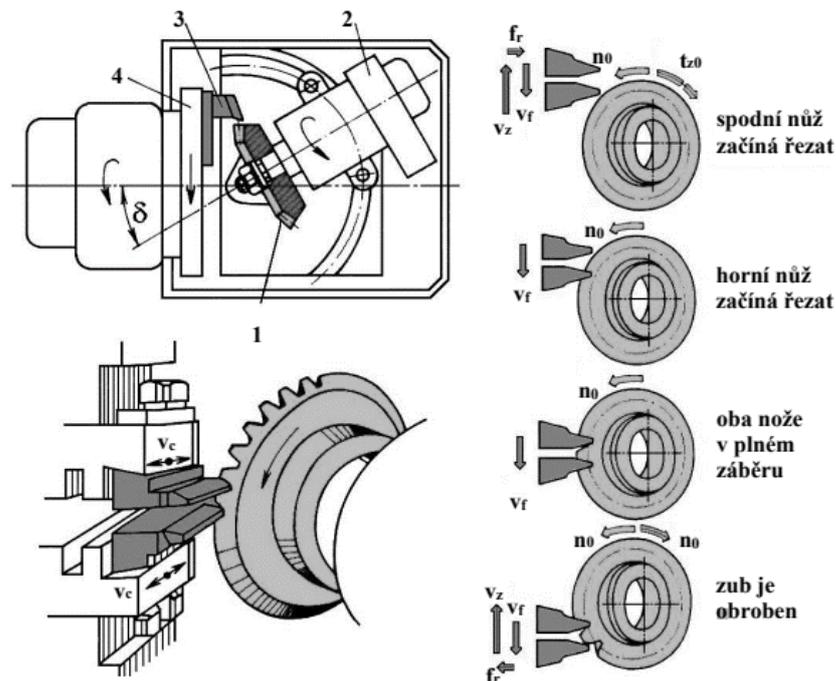
Kruhové těleso protahováku má po obvodu tělesa upnuté segmenty s břity tvaru zubové mezery. Nástroj rotuje a zároveň se posouvá podél zuby od nejmenšího profilu k největšímu. Obrobek je upnut na hřídel dělicího

přístroje a v místě vynechaných břitů se pootočí o jednu zubovou mezeru. K obrobení jedné zubové mezery dochází ve velmi krátkém času (v sekundách). [12,13]

1.9.1.4 Obrázení dvěma noži

Obrázení dvěma noži se v ČR řadí mezi nejrozšířenější výrobu kuželových kol. Lze ji aplikovat pro ozubení kol přímých, ale i šikmých zubů kol o průměrech až 1200 mm a hodnot modulu až do $m = 20$ mm. Při obrázení dvěma noži dochází k výrobě přesného evolventního tvaru zubů.

Nože lichoběžníkového tvaru konající řezný pohyb jsou upnuté v otočné hlavě a jsou užší než zubová mezera. Kolo se v průběhu obrábění jedno zubu pootáčí, takže se nože po kole odvalují. Po skončení obrázení obou boků zubů, kdež jeden nůž obrábí jeden bok, se nožová hlava a obrobek vrací do výchozí polohy a dělicí přístroj pootočí obrobkem o jednu rozteč. [12,13]

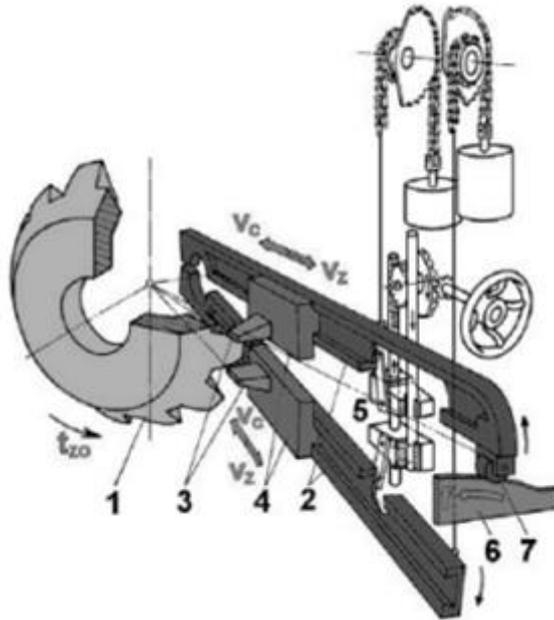


Obrázek 32 - Obrázení ozubení kuželových kol dvěma noži [12]:

1 - obráběné kolo, 2 - vřeteník obrobku s dělicím zařízením, 3 - obráběcí nože, 4 - nožová otočná hlava, v_c – řezný pohyb nožů, v_f – posuvný pohyb nožů, v_z – zpětný pohyb nožů, f_r – posun, t_{z0} – rotace obráběného kola o jednu rozteč

1.9.1.5 Obrázení dle šablony

Obrázení dle šablony je využíváno pro výrobu přesnějších kol s většími



moduly. Jednu šablonu lze použít pro stejný počet zubů kol o různých modulech pouze změnou vzdálenosti kola od roztečného vrcholu. Obrážecí nože se pohybují přímočarým vratným pohybem po vedení supportů a jejich přesná poloha je určena kopírovací kladkou, která je umístěna na konci supportu a která se odvaluje po šabloně. Vzhledem k tomu, že je ale ozubení obrázeno jen špičkami nástroje, nedosahuje vysoké jakosti povrchu. [12,13]

Obrázek 33 - Obrázení kuželových kol podle šablony [12]

1) obráběné kolo, 2) vedení supportů, 3) nože, 4) nožové hlavy, 5) posuvové zařízení, 6) šablona, 7) kladka

1.9.2 Výroba zakřivených zubů

Zhotovení kuželového kola se zakřivenými zuby je výrobně složitější než-li to bylo u přímých a šikmých zubů, proto se pro obrábění těchto zubů používají speciální metody pojmenované dle názvu obráběcího stroje a firmy, která danou metodu vynalezla.

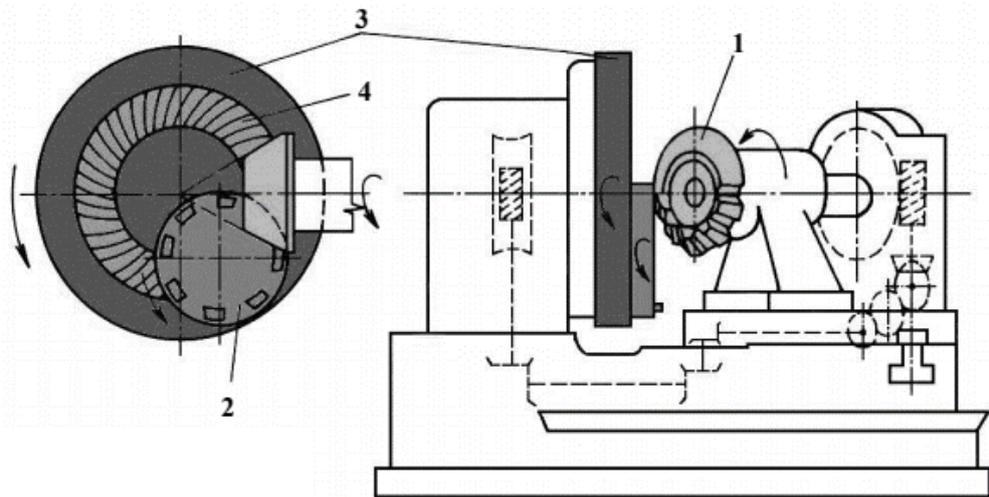
Jejich nevýhodou je zdlouhavé nastavení a seřízení strojů a nástrojů. Zuby (jednoho kola ze soukolí) vyrobené těmito metodami se po vyfrézování natírají barvou a pastorek i s kolem jsou upnuty do protáčecího zařízení, na kterém se zkouší budoucí provozní podmínky.

U následujících metod se vrcholový úhel roztečného kužele vyráběného kuželová kola shoduje s myšleným středem kola základního, což udává a usnadňuje zjištění montážní vzdálenosti kola.

1.9.2.1 Metoda Gleason

U ozubení Gleason mají zuby kruhově zakřivený profil. Touto metodou je možné obrábět kola od průměru 5 mm až do 800 mm a modulu $m = 0,5$ mm

až 16 mm. Nástrojem je zde čelní kruhová frézovací hlava, do které jsou vsazeny lichoběžníkové nože nabroušené pod úhlem profilu α_{mn} . Nože jsou v této hlavě rozestavěny střídavě s vnitřním a vnějším ostřím.



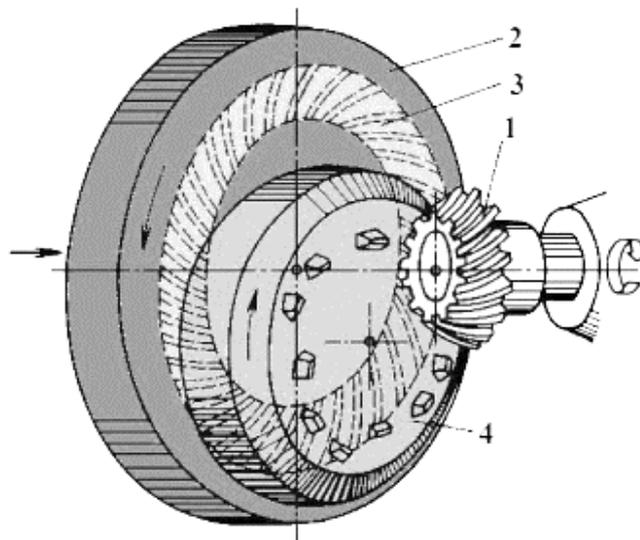
Obrázek 34 - Metoda Gleason [12]

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

Principem je odvalování pomyslného základního kola s obráběným ozubeným kolem. Nožová hlava je upnutá na unášecí desce pomyslného základního kola a rotuje. Nejdříve se obrobek přisune radiálně na hloubku zubové mezery a posléze na to se odvalovacím způsobem vyfrézuje jedna zubová mezera. Poté se obrobek odsune do původní polohy a pootočí o jednu rozteč. Unášecí deska změní smysl otáčení a celý cyklus se opakuje, jde tedy o dělicí způsob výroby. Aby bylo dosaženo správného odvalovacího pohybu, musí být vrchol roztečného kužele obráběného kola identický jako střed myšleného základního kola. [12,13]

1.9.2.2 Metoda Oerlikon

Metodou Oerlikon se vyrábí ozubená kola s boční křivkou zubu tvaru prodloužené epicykloidy. K vyfrézování zubů dochází plynulým odvalovacím způsobem. Jde o produktivnější metodu, než je např. dělicí metoda Gleason, ale vyrobené ozubení má horší vlastnosti. Nevýhodou je zdlouhavé seřizování strojů.

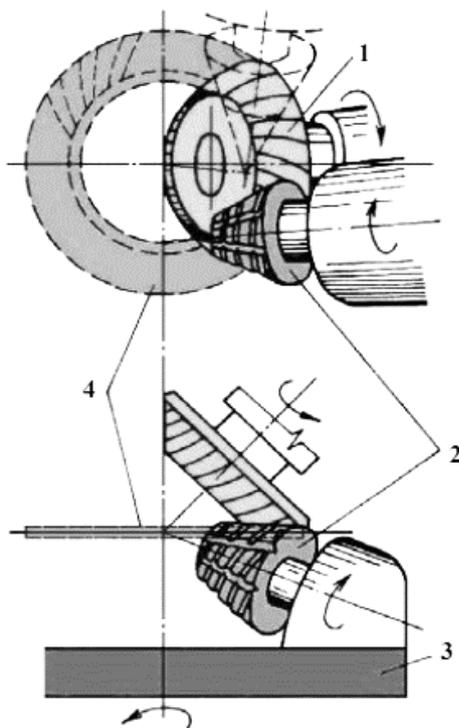


Obrázek 35 - Metoda Oerlikon [12]

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

Nástroj je čelní nožová hlava excentricky připevněná na unášecí desce. K výrobě ozubení dochází sdružením tří na sobě závislých pohybů – natáčením unášivé desky, rotací nožové hlavy a rotací obrobku. [12,13]

1.9.2.3 Metoda Klingelberg



Obrázek 36 - Metoda Klingelberg [12]

1) obráběné kolo, 2) kuželová odvalovací fréza, 3) unášecí deska, 4) pomyslné základní kolo

K výrobě paloidního ozubení se využívá metoda Klingelberg. Lze s ní obrábět ozubení menších a středních modulů do průměru až 850 mm. Vhodná je pro malosériovou nebo kusovou výrobu, jelikož přípravné a výrobní časy se pohybují v řádech desítek minut.

Plynulým odvalovacím způsobem se za pomoci kuželové frézy vytváří boky zubů. Zubová mezera je obdobně jako u metody Oerlikon tvořena kombinací tří závislých pohybů, a to rotačním pohybem frézy, rotačním pohybem obrobku a odvalovacím pohybem frézy na unášecí desce. [12,13]

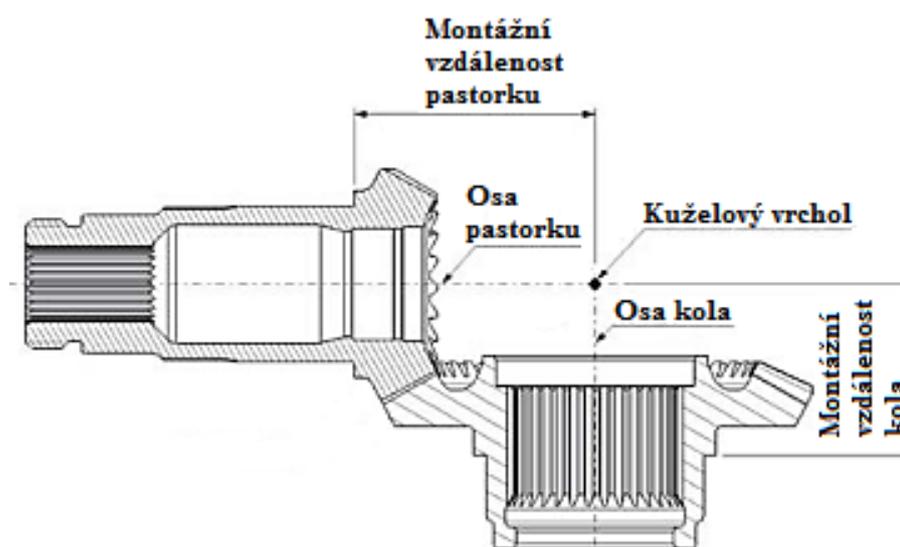
1.9.3 Ustavení kuželových kol

Kuželové soukolí musí být sestaveno tak, aby bylo zajištěno optimální rozložení zatížení mezi ozubenými koly a plynulý chod bez nadměrné vůle. Tato optimální poloha je obvykle určena výrobcem, avšak správné začlenění a uložení do převodové skříně je na konstruktérovi. Mezi hlavní důležité faktory patří montážní vzdálenost a již zmíněná vůle.

- Montážní vzdálenost

Je vzdálenost od zadní části ozubeného kola – nejčastěji ložiskového sedla k vrcholovému úhlu roztečného kuželu na ose. Běžná tolerance této délky je $\pm 0,05$ mm až $\pm 0,1$ mm. U kuželových kol s přímými zuby tvoří vrcholový úhel roztečného kužele pastorku i kola průsečík.

Pokud jsou obě kola soukolí obrobena jako sada, výrobce může stanovit tuto optimální vzdálenost za pomoci kontroly pásma záběru zubů a následným optimalizováním této vzdálenosti za pomoci speciálního stroje. Tato hodnota bude uvedena na výkrese. Příliš malá montážní vzdálenost jednoho nebo obou kol může mít za následek nadměrné opotřebení nebo dokonce zlomení zubů. Naopak pokud je vzdálenost delší, než specifikovaný rozměr vzniká nadměrná vůle. [15,16]



Obrázek 37 - Sestavení kuželového soukolí [16]

- Vůle

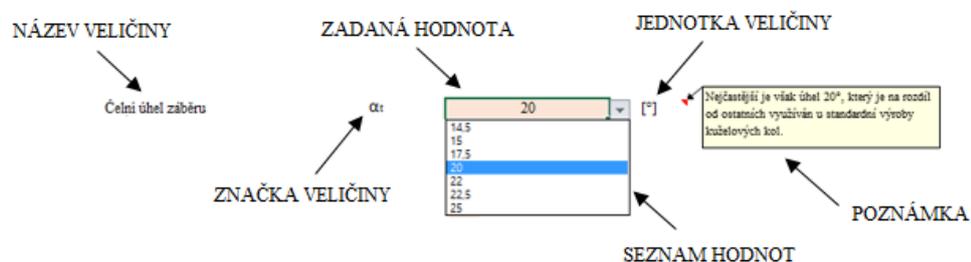
Definována jako prostor mezi spolu zabírajícím soukolím, nebo jako rozdíl šířek zubů spolu zabírajícího pastorku a kola. Určitá vůle je pro správný chod soukolí důležitá, nadměrná vůle však může způsobit nárazové zatížení při startu nebo reverzování a tím vést k nadměrnému opotřebením, hluku ale i vážnému poškození zubů. Vůli lze změnit posouváním polohy jednoho nebo obou kol (hřídelů na kterých jsou uložena). [15,16]

2. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část této bakalářské práce je věnována návrhu programu v Microsoft Excel pro výpočet kuželového soukolí a samotný návrh kuželového soukolí doplněný modelem a výkresy. Program je primárně určen k výpočtu kuželového soukolí pro přímé a šikmé ozubení typu I. Orientačně jej lze ale využít i pro výpočet kruhově či jinak zakřivených zubů typu II a typu III, zde je však nutno brát ohledy na pokyny a informace, které uvádí výrobce obráběcího zařízení.

2.1 Funkce a popis programu

Program využívá širokého spektra možností a funkcí, které Microsoft Excel nabízí – od obyčejných funkcí, přes podmíněná formátování až po makra. Mezi vstupní parametry (obr. 39) patří např. výkon na hnacím hřídeli P , otáčky hnacího hřídele n_1 , počty zubů pastorku i kola $z_{1,2}$, čelní úhel záběru α_t , úhel sklonu zubu β_m , úhel mezi osami Σ , požadovaná životnost L_h a poměrná šířka věnce Ψ_L . Další parametry jsou potřebné k vyplnění v případě návrhu normálového modulu m_{nm} , viz. příložený program. Hodnoty jsou obsluhou zadávány do zvýrazněných polí, jak je možno vidět na příkladu uvedeném na obr. 38.



Obrázek 38 - Popis polí programu

Na tomto obrázku jsou také k vidění prvky usnadňující vyplnění pole. Některé parametry a hodnoty je možné vybrat z normalizovaných nebo používaných řad prostřednictvím seznamu. V případě potřeby pomoci při zadávání hodnot je možné použít poznámku, jejíž snahou je co nejvíce navést, popř. určit hodnoty k vyplnění pomocí tabulek a obrázků v ní obsažené. Takové poznámky provádějí obsluhu celým programem.

U výpočtů korekcí soukolí jsou použita makra, je tak možné pomocí tlačítek rychle a efektivně měnit soukolí mezi N a VN. Další funkcí programu je vygenerování obrázku soukolí dle typu, který byl zvolen – ten obsahuje

nejdůležitější geometrické hodnoty, jenž vyznačují daný typ. Nakonec je několikrát použita funkce podmíněného formátování, např. při závěrečné kontrole, zda soukolí vyhovuje kontrole na ohyb a dotyk.

Po skončení návrhu a výpočtů je možné vytisknout připravený list určený k tisku, na němž jsou obsažené důležité parametry, hodnoty a koeficienty.

2.2 Ověření správnosti hodnot

Pro praktickou ukázkou bylo navrženo soukolí typu I, s korekcemi VN a následujícími vstupními parametry:

Vstupní hodnoty pro výpočet			
Výkon na hnacím hřídeli	P	5,0	[kW]
Otáčky hnacího hřídele	n_1	1500	[min^{-1}]
Počet zubů pastorku	z_1	17	
Počet zubů kola	z_2	21	
Čelní úhel záběru	α_t	20	[°]
Úhel sklonu zubu	β_m	0	[°]
Úhel mezi osami	Σ	90	[°]
Požadovaná životnost	L_h	100000	[hod]
Směr stoupání zubů pastorku		LEVÝ	
Poměrná šířka věnce	Ψ_L	0,35	
Materiálové hodnoty		Pastorek	Kolo
Stupeň přesnosti dle ISO 1328		6	°
Modul pružnosti pastorku a kola	E	206000	206000 [MPa]
Poissonova konstanta pastorku a kola	μ	0,3	0,3
Mez únavy v ohybu	σ_{Flim}	390	390 [MPa]
Mez únavy v dotyku	σ_{Hlim}	1140	1140 [MPa]
Exponent Wöhlerovy křivky pro ohyb	q_F	6	6
Exponent Wöhlerovy křivky pro dotyk	q_H	10	10
Bázový počet zatěžovacích cyklů pro ohyb	N_{Flim}	3000000	3000000
Bázový počet zatěžovacích cyklů pro dotyk	N_{Hlim}	100000000	100000000
Kinematická viskozita oleje	ν	50	[mm^2/s]

Obrázek 39 - Vstupní hodnoty pro výpočet z programu

Korekce navrženého soukolí VN byly spočteny komplexně dle vztahů:

$$x = 2 \cdot \left(1 - \frac{1}{u^2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\cos^3 \beta_m}{z_1}} \quad 2.1$$

$$x_\tau = a + b(u - 2,5) \quad 2.2$$

kde: a, b – konstanty závislé na úhlu sklonu zubů β_m (viz. tab. 6)

Tabulka 6 - Pomocné veličiny pro stanovení obvodového posunutí x_τ

β_m	0°-15°	15°-29	29°-40°	40° a větší
a	0,03	0,07	0,11	0,15
b	0,008	0,01	0,01	0,012

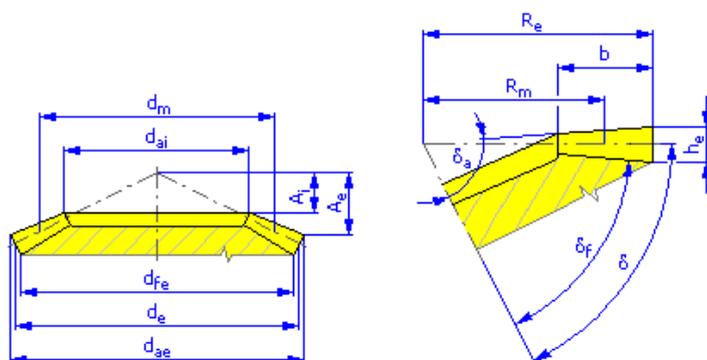
Po vložení vstupních parametrů program vypočetl dle vztahů z kapitol 1.4 Základní vztahy pro výpočet kuželových kol, 1.5 Silové poměry na kuželových kolech a 1.8 Pevnostní výpočty následující hodnoty:

Parametry a geometrie ozubení		Pastorek	Kolo
Typ ozubení		TYP I	
Druh ozubení		PŘÍMÉ	
Počet zubů pastorku a kola	z	17	21
Čelní úhel záběru	α_t	20	[°]
Úhel sklonu zubu	β_m	0	[°]
Úhel mezi osami	Σ	90	[°]
Kuželová vzdálenost vnější	L_e	40,937	[mm]
Kuželová vzdálenost střední	L_m	33,773	[mm]
Šířka věnce	b	14,328	[mm]
Vnější roztečný průměr	d_e	51,515	63,636 [mm]
Vnější průměr hlavové kružnice	d_{ae}	57,013	66,812 [mm]
Vnější průměr patní kružnice	d_{fe}	46,650	58,423 [mm]
Střední roztečný průměr	d_m	42,500	52,500 [mm]
Vnější výška zubu	h_e	6,667	6,667 [mm]
Vnější tloušťka zubu	s_e	5,189	4,331 [mm]
Výška hlavového kužele	A	29,593	23,796 [mm]
Úhel roztečného kužele	δ	38,991	51,009 [°]
Úhel hlavového kužele	δ_a	43,929	54,537 [°]
Úhel patního kužele	δ_f	34,619	45,230 [°]
Virtuální počet zubů	z_v	21,872	33,376
Roztečný průměr	d_v	54,680	83,440 [mm]
Jednotkové posunutí	x	0,16719	-0,16719
Jednotková změna tloušťky zubu	x_t	0,019882	-0,01988
Smysl stoupání		LEVÝ	
Obvodová síla	F_t	1498,04	[N]
Normálová síla	F_N	1594,18	[N]
Radiální síla	F_r	423,79	343,07 [N]
Axiální síla	F_a	343,07	423,79 [N]
Součinitel bezpečnosti v ohybu	S_F	4,01	3,92
Součinitel bezpečnosti v dotyku	S_H	1,37	1,37
Koeficienty pro pevnostní výpočty			
SPOLEČNÉ PRO OHYB I DOTYK			
K_A		1,1	
K_V		1	
PRO OHYB		PRO DOTYK	
K_F	1,1	K_H	1,1
K_{Fa}	1	K_{Ha}	1
$K_{F\beta}$	1	$K_{H\beta}$	1
Y_{Fa}	2,52 2,8	Z_E	189,81 [MPa] ^{1/2}
Y_{Sa}	1,76 1,62	Z_{ϵ}	0,787
Y_{ϵ}	0,715	Z_H	2,490
Y_{β}	1,000	Z_N	0,85
Y_A	1 1	Z_L	0,927
Y_T	1 1	Z_R	1
Y_N	1 1	Z_V	0,960
Y_{δ}	1,2 1,2	Z_{β}	1
Y_X	1 1	Z_X	1
Y_R	1 1	Z_K	0,800
Y_K	0,800		

Obrázek 40 – Screenshot tabulky výsledných hodnot z programu

Takto vypočtené hodnoty bylo třeba zkontrolovat i jiným programem. Zadáním stejných vstupních parametrů (jako jsou k vidění výše na obr. 39) spočetl generátor kuželových kol programu Autodesk Inventor níže přiložené hodnoty (obr. 41):

Převodový poměr	i	1,2353 ul
Čelní modul	m_{et}	3,030 mm
Úhel sklonu	β	0,00 deg
Čelní úhel profilu	α_t	20,0000 deg
Úhel os	Σ	90,00 deg
Součinitel trvání záběru	ϵ	1,6125 ul
Virtuální převodový poměr	i_v	1,526 ul
Ekvivalentní středová vzdálenost	a_v	69,060 mm
Vnější délka povrchy roztečného kužele	R_e	40,937 mm
Délka povrchy na středním kuželu	R_m	33,773 mm

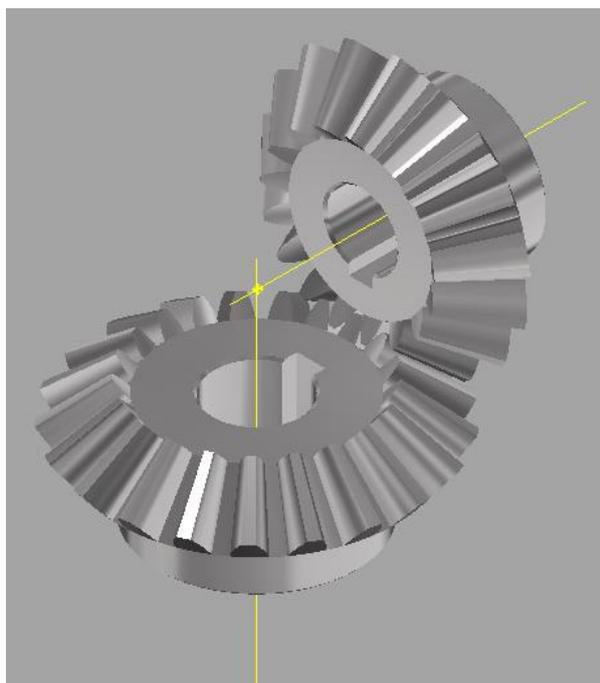


	Kolo 1	Kolo 2	
Typ modelu	Komponenta	Komponenta	
Počet zubů	z	17,000 ul	21,000 ul
Jednotkové posunutí	x	0,167 ul	-0,1672 ul
Jednotková změna tloušťky zubu	x_t	0,0199 ul	-0,0199 ul
Vnější roztečný průměr	d_e	51,515 mm	63,636 mm
Střední roztečný průměr	d_m	42,500 mm	52,500 mm
Hlavový průměr na konci	d_{ae}	57,013 mm	66,812 mm
Vnější patní průměr	d_{fe}	46,650 mm	58,423 mm
Vzdálenost vrcholu	A_e	29,593 mm	23,796 mm
Úhel roztečného kužele	δ	38,9910 deg	51,0090 deg
Úhel hlavového kužele	δ_a	43,9290 deg	54,5367 deg
Úhel patního kužele	δ_f	34,6191 deg	45,2301 deg
Šířka ozubení	b	14,328 mm	
Šířkový poměr	b_r	0,3500 ul	
Výška zubu	h_e	6,667 mm	6,667 mm
Vnější tloušťka zubu	s_e	5,189 mm	4,331 mm
Náhradní počet zubů	z_v	21,872 ul	33,376 ul
Ekvivalentní průměr stoupání	d_v	54,680 mm	83,439 mm
Ekvivalentní vnější průměr	d_{va}	60,516 mm	87,603 mm
Ekvivalentní průměr základní kružnice	d_{vb}	51,383 mm	78,407 mm

Obvodová síla	F_t	1497,931 N	
Normální síla	F_n	1594,065 N	
Radiální síla (směr 1)	F_{r1}	423,756 N	343,040 N
Radiální síla (směr 2)	F_{r2}	423,756 N	343,040 N
Osová síla (směr 1)	F_{a1}	343,040 N	423,756 N
Osová síla (směr 2)	F_{a2}	343,040 N	423,756 N
Součinitel bezpečnosti v dotyku		S_H	1,367 ul 1,369 ul
Součinitel bezpečnosti v ohybu		S_F	4,010 ul 3,921 ul
Kontrolní výpočet		Kladný	

Obrázek 41 - Hodnoty získané programem Autodesk Inventor

Z výše uvedených tabulek lze konstatovat, že geometrické rozměry a zejména kontrola soukolí na ohyb a dotyk odpovídají a vyhovují. Výpočet je doplněn modelem (obr. 42), který byl taktéž vygenerován programem Autodesk Inventor. Obě kola jsou opatřena perem sloužícím ke spojení hřídele s nábojem – v tomto případě s kuželovým kolem.



Obrázek 42 - Model vygenerovaný za pomoci Autodesk Inventor

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo sepsat rešerši o kuželových kolech obsahující druhy ozubených kol, způsoby výroby a ustavení kuželových kol. Rešerše byla rozšířena o další témata důležitá k pochopení a návrhu kuželových kol, jako je samotná geometrie těchto kol a materiály vhodné k použití na výrobu. Práce se také zabírala normou ISO 10 300 1-3, která popisuje pevnostní výpočty a koeficienty k tomu určené.

V Praktické části je zobrazena ukázka návrhu kuželového soukolí, jenž je doplněna snímky přímo z programu, na kterých jsou vypočtené hodnoty. Tyto hodnoty byly porovnány s generátorem kuželových kol v programu Autodesk Inventor, který jsem pro porovnání vybrala i z důvodu pozdější potřeby vygenerování modelu a výkresů dle něj vytvořených. Po zjištění správných a odpovídajících parametrů byl tento model vygenerován a je rovněž uveden v praktické části. Za pomoci tohoto modelu byly vytvořeny výkresy pastorku a kolu, které jsou přiloženy k této práci.

Nejdůležitějším výsledkem práce byl však program vytvořený v Microsoft Excel, který je po zadání vstupních parametrů schopen intuitivně vypočítat geometrické hodnoty kuželové soukolí různých typů s různými druhy ozubení. Program využívá rozmanitých schopností a funkcí Microsoft Excel, které činí program pro výpočet kuželového soukolí rychlým a účinným pomocníkem při základním návrhu kuželových soukolí. Prvním krokem programu je předběžný návrh normálového modulu, od kterého se odvíjí většina vztahů. Po zvolení nejbližšího vyššího normalizovaného modulu obsluhou z rozevíracího seznamu, je možnost volby korekce soukolí, která je makrem přiřazena k aktivním tlačítkům. Program dokáže korigovat soukolí N a VN, je ale také možné zadat vlastní hodnoty korekcí. Korekce VN se řídí komplexními vztahy, které závisí na zadaném vstupním úhlu sklonu zubu β_m . Další využívanou funkcí je podmíněné formátování, které zaručí, že obsluha ví, zda byly dodrženy podmínky a zda spočtené hodnoty leží ve správném rozsahu. Obsluha je v celém programu provázena poznámkami a komentáři, které ji napomáhají při vyplňování a určování koeficientů apod.

Po zhodnocení výsledků v praktické části mohu konstatovat, že výše vypsané cíle byly ve všech bodech splněny.

SEZNAM ZDROJŮ

- [1] JOSEPH E. SHIGLEY, CHARLES R. MISCHKE a RICHARD G. BUDYNAS. *Mechanical engineering design / Joseph Shigley, Charles Mischke and Richard Budynas*. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2004. ISBN 9780071232708.
- [2] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: mechanické převody*. Praha: České vysoké učení technické, 1999. ISBN isbn80-01-01934-9.
- [3] GIESECKE, Frederick E. *Technical drawing with engineering graphics*. 14th ed. Boston: Prentice Hall, c2012. ISBN 0135090490.
- [4] HELLER, Josef, HRUŠKA, Zdeněk. *Strojní součásti II : pro střední průmyslové školy strojnické*. 1. vyd. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1986. 120 s.
- [5] JELASKA, Damir. *Gears and gear drives* [online]. Hoboken: John Wiley and Sons, 2012, 444 s. ISBN 9781118392706.
- [6] Bevel gears. In: *Linngear.com* [online]. [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: <http://www.linngear.com/part-type/bevel>
- [7] *Manutencaoesuprimentos.com* [online]. Manutenção & Suprimentos. ©2015 [vid. 2015-03-22]. Dostupné z: http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/imagens/caracteristicas-das-engrenagens-hipoides_.jpg
- [8] BOLEK, Alfréd. *Části strojů II: Převody a převodová ústrojí*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1963
- [9] ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky: pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-20-3.
- [10] *Calculation of load capacity of bevel gears: ISO 10300-(1,2,3)*. 2001.
- [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] *TECHNOLOGIE I, TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část: Doc. Ing. Anton Humár, CSc.* [online]. VUT Brno [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf

[13] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

[14] Mlgeardesigns.blog.cz [online]. Výroba kuželových ozubených kol se zakřivenými zuby. Dostupné z: http://nd06.jxs.cz/853/110/c57c573b87_95632393_o2.jpg

[15] *How to install bevel gears for peak performance* [online]. , 3 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: http://www.arrowgear.com/pdf_files/install.pdf

[16] *How to Design and Install Bevel Gears for Optimum Performance: Lessons Learned* [online]., 10 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: <https://www.geartechnology.com/issues/0613x/bevel-gear-installation.pdf>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Základní rozměry kuželového kola.....	3
Obrázek 2 - Dělení kuželového soukolí dle velikosti úhlů mezi osami hřídelů	5
Obrázek 3 - Kuželové soukolí s osami různoběžnými	5
Obrázek 4 - Kuželové soukolí s osami mimoběžnými	5
Obrázek 5 - Kolo s přímými zuby	6
Obrázek 6 - Kolo s šikmými zuby	6
Obrázek 7 - Rozdělení kuželových kol podle zakřivení	7
Obrázek 8 - Tvar věnce I	9
Obrázek 9 - Tvar věnce II	9
Obrázek 10 - Tvar věnce III.....	10
Obrázek 11 - Základní geometrické prvky pastorku a kola typu I	10
Obrázek 12 - Síly na kuželovém kole s přímými zuby	13
Obrázek 13 - Silové poměry kola s přímými zuby	14
Obrázek 14 - Silové poměry kola s nepřímými zuby	15
Obrázek 15 - Vyhovující plocha záběru	16
Obrázek 16 - Typické uspokojivé vzory záběrů	17
Obrázek 17 - Neuspokojivé vzory záběrů.....	17
Obrázek 18 - Závislost dynamického součinitele K_V na obvodové rychlosti.....	21
Obrázek 19 - Součinitel nerovnoměrnosti zatížení $KH\beta$	22
Obrázek 20 - Součinitel tvaru zubu Y_{Fa}	23
Obrázek 21 - Závislost počtu virtuálních zubů na úhlu záběru	23
Obrázek 22 - Součinitel koncentrace napětí Y_{Sa}	24
Obrázek 23 - Součinitel spoluzabírajících zubů Z_H	26
Obrázek 24 - Součinitel vlivu maziva Z_L	27
Obrázek 25 - Součinitel vlivu jakosti povrchu Z_R	27
Obrázek 26 - Součinitel vlivu obvodové rychlosti Z_V	28
Obrázek 27 - Modulové frézy	29
Obrázek 28 - Frézování tvarovou kotoučovou frézou	30
Obrázek 29 - Navzájem se překrývající nožové hlavy	30
Obrázek 30 - Frézování nožovými hlavami.....	31
Obrázek 31 - Protahování kuželových kol.....	31
Obrázek 32 - Obrázení ozubení kuželových kol dvěma noži	32
Obrázek 33 - Obrázení kuželových kol podle šablony	33
Obrázek 34 - Metoda Gleason	34
Obrázek 35 - Metoda Oerlikon	35
Obrázek 36 - Metoda Klingelnberg	35
Obrázek 37 - Sestavení kuželového soukolí	36
Obrázek 38 - Popis polí programu	38
Obrázek 39 - Vstupní hodnoty pro výpočet z programu	39
Obrázek 40 - Screenshot tabulky výsledných hodnot z programu	40
Obrázek 41 - Hodnoty získané programem Autodesk Inventor	42
Obrázek 42 - Model vygenerovaný za pomoci Autodesk Inventor	42

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Jmenovité rozměry kuželových kol dle řídicí křivky zubu	8
Tabulka 2 - Závislost zakřivení zubů a směr momentu na axiální a radiální síle.....	16
Tabulka 3 - Nejčastěji využívané materiály na výrobu kuželových kol v ČR	19
Tabulka 4 - Empirické hodnoty K_A	21
Tabulka 5 - Součinitelé nerovnoměrnosti zatížení zubů v záběrovém poli $K_{F\alpha}$ a $K_{H\alpha}$..	22
Tabulka 6 - Pomocné veličiny pro stanovení obvodového posunutí x_τ	39

SEZNAM PŘÍLOH

Program pro výpočet kuželového soukolí – soubor vytvořený v Microsoft Excel

Výrobní výkres pastorku BP - 01

Výrobní výkres kola BP - 02