

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ČELNÍ OZUBENÁ KOLA Z PLASTŮ

PLASTIC SPUR GEARS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB JORDÁN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VENCLÍK, Dr.

BRNO 2008

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je popsat problematiku plastových ozubených kol a podat přehled současného stavu poznání v této oblasti. Práce se zabývá materiálem, konstrukcí a výpočtem ozubených kol z plastů. Obsahuje také nejčastější poruchy těchto kol a vývojové trendy používané ve strojírenství.

Klíčová slova: plast, vlastnosti plastů, plastové ozubené kolo, materiál, porušení ozubených kol, konstrukce ozubených kol, výhody a nevýhody plastových ozubených kol

ABSTRACT

The bachelor work deals with describe to problems plastic gears and give actual state of knowledges in this section. The work deals with material, constuction and calculation plastic gears. Contains most frequent gear failure this gears and developments apply in mechanical engineering.

Key words: plastic material, properties plastic material, plastic gear, material, gear failure, construction gears, advantages and disadvantages plastic gears

Bibliografická citace:

JORDÁN, J. Čelní ozubená kola z plastů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 31 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Venclík, Dr.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Jiřího Venclíka, Dr. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 16. května 2008

.....

Jakub Jordán

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Venclíkovi, Dr. za odborné vedení mé práce, podnětné připomínky a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	12
1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PLASTŮ	13
1.1 Definice plastů	13
1.2 Srovnání vlastností plastů a kovů	13
2 MATERIÁL OZUBENÉHO KOLA.....	14
2.1 Požadavky kladené na materiál	14
2.2 Plasty pro výrobu ozubených kol	14
2.3 Vlastnosti plastů ovlivňující rozměry	15
2.3.1 Smrštění při tváření	15
2.3.2 Dodatečné smrštění.....	15
2.3.3 Tečení (creep)	15
2.3.4 Roztažnost navlhnutím	15
3 OZUBENÁ KOLA.....	16
3.1 Vyráběné druhy čelních ozubených kol	16
3.2 Výhody a nevýhody ozubených kol z plastu	17
3.3 Možnosti využití plastových ozubených kol	17
3.4 Činitele ovlivňující únosnost a životnost	18
3.4.1 Modul ozubení.....	18
3.4.2 Šířka zubů	18
3.4.3 Korekce ozubení	18
3.4.4 Teplota	18
3.4.5 Mazání	19
3.4.6 Dynamika zatížení	19
3.4.7 Obvodová rychlost.....	19
4 TYPY PORUŠENÍ OZUBENÝCH KOL.....	20
4.1 Adheze	20
4.2 Abraze.....	20
4.3 Teplotní únava	20
4.4 Tečení materiálu	21
4.5 Lomové porušení	21
4.6 Důlková koroze (pitting)	21
5 VÝPOČET OZUBENÝCH KOL.....	22
5.1 Ohybové namáhání	22
5.2 Kontaktní namáhání.....	22
5.3 Další možnosti výpočtu	22
6 KONSTRUKCE A VÝROBA OZUBENÝCH KOL.....	23
6.1 Obráběná kola.....	23
6.2 Vstřikovaná ozubená kola	24
6.2.1 Princip vstřikování.....	24
6.2.2 Konstrukce vstřikovaných ozubených kol.....	25
7 PŘEHLED A ROZBOR LITERATURY	26
8 VÝVOJOVÉ TRENDY	27
9 ZÁVĚR	28
10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	29
11 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	31

ÚVOD

V moderním životě mají plasty velmi důležitý význam a to nejen ve strojírenském průmyslu, ale i v ostatních oborech lidské činnosti. Používání plastů na výrobu strojních dílů prochází stále novými inovacemi a vývoji, které umožňují tento materiál využít i na namáhané aplikace jenž v minulosti nešly s tímto materiálem uskutečnit.

Moderní plastové materiály mají mnohem lepší vlastnosti a začínají se tak stále více přibližovat vlastnostem ocelových materiálů. Jejich výhodou je hlavně úspora hmotnosti, schopnost tlumení rázů a především laciný způsob zpracování tvářením. Tato velmi důležitá kritéria hrají hlavní roli v mnoha aplikacích.

V současné době již plasty ve strojírenství pevně zakotvily a jejich rozvoj v tomto odvětví bude nadále zkoumán a rozšiřován a jak se ukazuje, i na extrémně namáhané součásti jako jsou např. ozubená kola z plastů.



Obr. 0-1 Ukázka plastových ozubených kol [15]

1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PLASTŮ

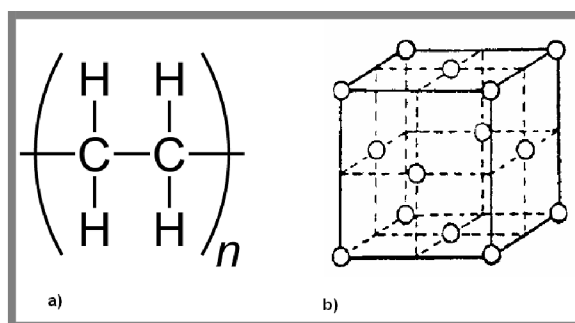
1

1.1

1.1 Definice plastů

Chování i struktura plastů je velmi odlišná od kovů. Je to způsobeno především tím, že plasty jsou makromolekulární látky (polymery) a jejich struktura je tvořena makromolekulárními řetězci, tj. dlouhými molekulami s opakujícími se základními strukturálními jednotkami (viz.Obr.1-1a) a tyto řetězce mohou nebo nemusí být mezi sebou spojeny chemickými vazbami. Kovy jsou naproti tomu uspořádány v krystalických mřížkách (viz.Obr.1-1b), a jejich jednotlivé atomy (ionty) jsou navzájem vázány pevnými meziatomovými vazbami, které jsou příčinou jejich typické vysoké pevnosti. Kromě polymerních látek obsahují plasty ještě různé přísady (aditiva), jejichž účelem je specifická úprava vlastností. [1]

Prvním způsobem výroby plastů je chemická přeměna přírodních látek, např: vulkanizace kaučuku nebo přeměna celulózy. Druhý způsob spočívá v syntetické výrobě postupy běžnými v makromolekulární chemii a to většinou z přírodních surovin (uhlí, ropy, zemního plynu). Podle chování plastické hmoty za tepla můžeme plasty rozdělit na **termoplasty**, které jsou teplem netvrditelné a zahřátím přecházejí do plastického stavu a na **termosety**, které teplem nevratně tvrdnou. [5]



Obr. 1-1 Makromolekulární řetězec a krystalická mřížka ([13] a [14])

Příklad makromolekulárního řetězce – polyethylen (PE) Obr. 1-1a [13]

Struktura tvořená krystalickou mřížkou Obr. 1-1b [14]

1.2 Srovnání vlastností plastů a kovů

1.2

Výhodou plastů je schopnost tlumit rázy a vibrace, ale jejich rozměrová a tvarová stálost je značně horší než u kovů. Důvodem je hlavně velká teplotní roztažnost plastů, absorpce vzdušné vlhkosti a dodatečné smrštění po vstříknutí plastu (viz. kapitola 2.3). Odolnost vůči chemickým vlivům např. kyselinám, zásadám, rozpouštědlům a jiným činidlům je různá podle druhu plastu, ale většinou je lepší než u kovů. Při zvyšování teploty se u všech plastů snižuje pevnost a modul pružnosti, ale roste tažnost a houževnatost až do měknutí polymeru. Běžné plasty odolávají teplotám do 60 až 80 °C, dražší, tzv. konstrukční plasty do 100 až 120°C, zvláštní druhy plastů až přes 200°C což bývá pro mnohé aplikace dostačující.[1]

2 MATERIÁL OZUBENÉHO KOLA

2.1 Požadavky kladené na materiál

Dynamické namáhání (ohyb v patě zubu, smykové tření na bocích zubu a kontaktní tlak) evolventního ozubeného kola je hlavním důvodem požadovat od plastových materiálů ozubených kol především tyto vlastnosti: [1]

- minimální tření
- vysokou mez únavy
- co největší otěruvzdornost
- velkou rázovou a vrubovou houževnatost
- vyhovující rozměrovou stabilitu při změnách teploty a vlhkosti
- schopnost tlumit rázy a chvění
- odolnost proti zvýšeným teplotám, vodě, mazivům a rozpouštědlům

Při návrhu a aplikaci plastových kol je nutno uvážit, které vlastnosti budeme především požadovat. Žádný plast totiž neposkytuje jednoznačně nejlepší kombinaci těchto vlastností. [1]

2.2 Plasty pro výrobu ozubených kol

Literatura [2] uvádí tyto nejpoužívanější plasty pro výrobu ozubených kol:

Tab. 2-1 Vlastnosti plastů pro výrobu ozubených kol [2]

Vlastnosti plastů pro výrobu ozubených kol						
Plast	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Modul pružnosti [MPa]	Vrbová houževnatost [kJ/m ²]	Tvrdost vtiskem kuličky [MPa]	Dlouhodobá teplota použití [°C]	Součinitel teplotní roztažnosti 10 ⁻⁶
PA6	1,14	3200	>3	170	-40 až +85	90
PA 66	1,15	3300	>3	180	-30 až +95	80
PA 46	1,18	3100	6	168	-40 až +135	80
POML	1,41	3000	8	150	-50 až +90	110
POM-C	1,42	3200	10	160	-50 až +100	100
PET	1,38	3000	3,5	170	-20 až +115	60
PBT	1,30	2500	-	130	-30 až +120	145
PEEK	1,32	4000	5	230	-60 až +250	50
PEI	1,27	3100	4	220	-50 až +170	45

Pramen: SustaPlast

Zavedením vstřikovatelných typů plastů především polyamidů (PA) vedlo k velkému obratu ve výrobě ozubených kol. Se vzrůstajícím rozvojem výroby polymerů se postupně uplatňují další typy termoplastů a jejich modifikace. V současnosti se nejvíce používají: [2]

polyamidy PA 6, PA 66, PA 11, PA 46
 polyoxymetyleny (POM-C, POM-M)
 polyetylentereftalát (PET)
 polybutylenetereftalát (PBT)
 polyeterimid (PEI)
 polyetereterketon (PEEK)

2.3 Vlastnosti plastů ovlivňující rozměry

2.3

Součást vyrobená z plastu nemůže dosáhnout přesnosti součástí obráběných z kovů, protože podléhá rozměrovým změnám, které nedovolují dosažení větších přesností. Literatura [1] uvádí následující přehled vlastností:

2.3.1 Smrštění při tváření

2.3.1

Pro daný plast nelze zcela přesně stanovit, protože závisí na tvaru výrobku, na materiálu, umístění vtoku při vstřikování a na zpracovatelských podmínkách (teploty, tlaky, časy). Jejich změnou je možno měnit rozměry výrobku, nevýhodou je změna hustoty a tím i zhoršení mechanických vlastností.

2.3.2 Dodatečné smrštění

2.3.2

Co do velikosti je dodatečné smrštění několikanásobně menší než smrštění při tváření a probíhá samovolně po několik týdnů nebo měsíců. Hlavní příčinou vzniku je uvolňování vnitřního pnutí, dokrystalizace, dodatečné zesíťování u reaktoplastů apod.

2.3.3 Tečení (creep)

2.3.3

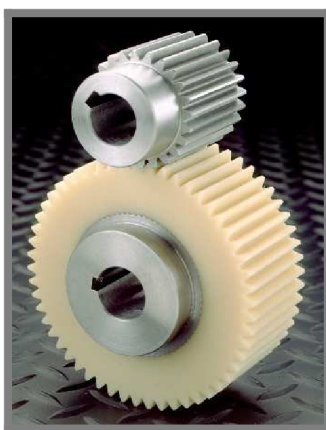
Zahrnuje všechny tři složky deformací elastickou, viskoelastickou a plastickou, z nichž nejvýraznější je deformace plastická. Tečení vzniká při dlouhodobém zatížení plastových součástí, je větší při vyšším napětí, při vyšší teplotě a pochopitelně roste s časem.

2.3.4 Roztažnost navlhnutím

2.3.4

Jedná se o vratnou změnu rozměrů navlhavých plastů způsobenou absorpcí vody z okolního prostředí. Vratnou v tom smyslu, že po opětovném vysušení se rozměry vrátí do svých výchozích hodnot.

Při vzájemném uložení plastových a kovových částí je nutno si uvědomit, že kovy nenavlhají a jejich teplotní roztažnost je proti plastům zanedbatelná. Proto se počáteční vůle nebo přesahy budou při změnách teploty a okolní vlhkosti měnit. Například věnec plastového ozubeného kola nalisovaný na ocelový náboj se ohřevem nebo navlhnutím může uvolnit. [1]



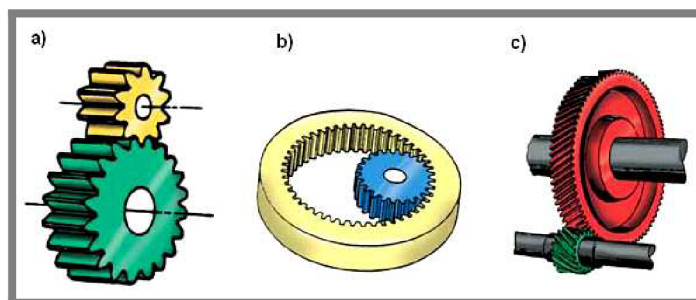
Obr. 2-1 Nastříkнутý věnec na kovový kotouč [9]

3 OZUBENÁ KOLA

Plastová ozubená kola se používají pro přenosy menších sil při nižších obvodových rychlostech, obvykle tam, kde požadujeme provoz bez mazání. Dobré tlumení rázů, vibrací, tichý chod a odolnost proti korozi jsou hlavním důvodem jejich aplikací ve strojírenství. Vstřikovaná ozubená kola z termoplastů umožňují levnou sériovou výrobu malých ozubených kol i s geometricky složitým ozubením a obráběná nebo odlévaná ozubená kola mohou naproti tomu dosahovat velkých rozměrů. [1]

3.1 Vyráběné druhy čelních ozubených kol

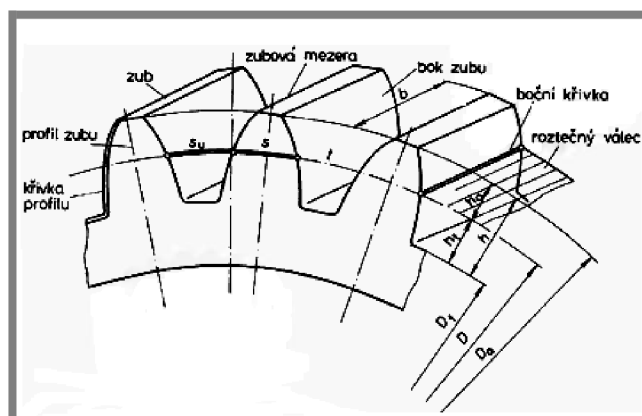
Druhy používaných ozubených kol z plastu jsou v podstatě shodné s ocelovými.



Obr. 3-1 Používané druhy čelních ozubených soukolí [6]

Mezi nejpoužívanější druhy soukolí ve strojírenství patří **čelní ozubené soukolí s přímým ozubením** (viz. Obr. 3-1a), **čelní ozubené soukolí s vnitřním ozubením** (viz. Obr. 3-1b) a **čelní ozubené soukolí se šikmým ozubením** (viz. Obr. 3-1c).

Při výrobě ozubeného kola můžeme použít nástroje pro standardní evolventní ozubení (viz. Obr. 3-2) metodou třískového obrábění nebo využijeme speciální tvarové nástroje a vyrobíme tak i nestandardní ozubení. Je-li však kolo vyráběno vstřikováním jsou pravidla pro návrh geometrie poněkud volnější (především v oblasti patní přechodové křivky), což může být v některých případech přínosné. [3]



Obr. 3-2 Standardní evolventní ozubení [11]

3.2 Výhody a nevýhody ozubených kol z plastu

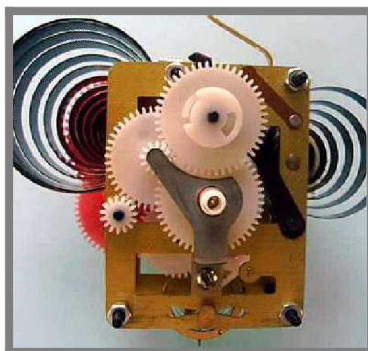
Mezi výhody plastových ozubených kol literatura [2] uvádí:

- nízká hmotnost
- schopnost tlumení hluku
- tlumení vibrací a rázů
- dobré kluzné vlastnosti (samomaznost)
- tuhost a tvrdost při dostatečné houževnatosti
- výborná chemická a korozní odolnost
- nízká otěrovzdornost a odolnost proti opotřebení
- nevyžadují větší údržbu

Plastová kola mají však i určitá omezení, která vyplývají z vlastností plastových materiálů. Nedoporučují se aplikace soukolí přenášející velký výkon při vysokém počtu otáček. Rovněž se nedoporučují ozubená kola menších rozměrů, na něž jsou kladeny vysoké nároky provozních podmínek. Vlivem skluzu dochází na bocích zubů při záběru kol k vývinu tepla, které při vysokých hodnotách obvodové rychlosti a nízké tepelné vodivosti plastů může vést k nežádoucímu zvýšení teploty na povrchu zubů a k následnému poklesu jejich pevnosti v ohybu. Snížení měrných skluzů lze docílit použitím nestandardního ozubení typu LCR s nízkým součinitelem trvání záběru profilu. Ozubení typu HRC není pro plastová ozubená kola vhodné právě vzhledem k vysokým hodnotám měrných skluzů a proto se tento typ ozubení využívá výhradně jen u kol ocelových. [2]

3.3 Možnosti využití plastových ozubených kol

Využití plastových ozubených kol je v současné době v mnoha průmyslových oborech. Jedná se především o převodové nebo pohonné mechanismy strojů a zařízení spadající do oblasti lehkého strojírenství. Nejčastější aplikace jsou např. u strojů textilních, balících, potravinářských, tiskářských, papírenských, v dopravních linkách, ale také v automobilovém průmyslu u ovládacích nebo regulačních systémů interiérového vybavení. Další velmi využívanou oblastí jsou mechanismy kancelářských strojů, laboratorních přístrojů, optických a fotografických přístrojů a měrných zařízení na vodu, plyn aj. Významnými obory, využívající plastová ozubená kola jsou výrobky „bílého zboží“ – kuchyňské přístroje, pračky, myčky, ale také zahradní technika. [2]



Obr. 3-3 Příklad použití plastových ozubených kol [7]

3.4 Činitele ovlivňující únosnost a životnost

Literatura [1] uvádí následující činitele:

3.4.1 Modul ozubení

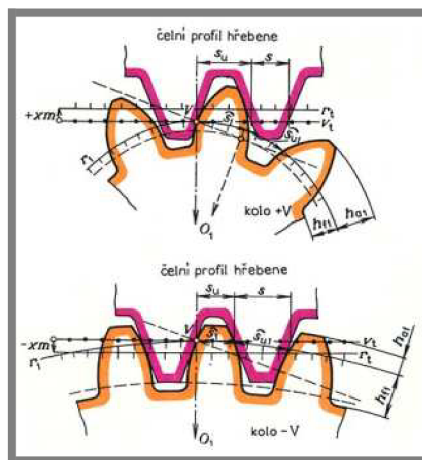
Houževnaté termoplasty jako jsou např.: PA nebo POM zvětšují svoji únosnost s relativně se zmenšujícím modulem ozubení, protože poddajnější malé zuby přenášejí zatížení na větší počet párů zubů. Přesnost záběru u malých zubů ovlivňuje malá rozměrová přesnost plastových součástí více než u velkých zubů, a tím klesá i únosnost ozubených kol.

3.4.2 Šířka zubů

Menší přesnost geometrie ozubení ve směru osy kola je způsobena zvětšováním šířky zubů a to snižuje přesný záběr zubů podél jejich šířky. U tuhých a vyztužených plastů následuje snížení únosnosti ozubených kol, ale u houževnatých plastů se zuby zčásti deformací přizpůsobí a pokles únosnosti není tak výrazný.

3.4.3 Korekce ozubení

Korekce se u plastových ozubených kol používají ze stejných důvodů jako u kol ocelových. Kladná korekce zvětšuje tloušťku zubu v patě, snižuje Hertzův tlak a vyrovnává měrné skluzu, čímž zvyšuje ohybovou a kontaktní pevnost zubů. Zápornou korekci využíváme ke zmenšení tloušťky zubu v patě viz. Obr. 3-4.



Obr. 3-4 Korigovaná kola s posunutím +V a -V [16]

3.4.4 Teplota

Teplota je velmi důležitý faktor, který musíme při provozu plastových ozubených kol uvažovat. Nejvyšší teplotu naměříme na povrchu zubových boků, kde dochází k záběru. Teplu vzniklé záběrem soukolí se zčásti odvádí protilehlým kolem, zčásti hřídelem plastového kola a okolním vzduchem vířící kolem soukolí. Zvýšení teploty má za následek zvětšení otěru a porušování zubových boků což nám zkracuje životnost kola. Zvláště nebezpečné je zvýšení teploty jsou-li obě spoluzabírající kola z plastů.

3.4.5 Mazání

Olejové mazání zmenšuje tření při záběru i rychlost otěru, ale přítomnost oleje podporuje tvorbu pittingu. Olejový film dále snižuje vývin třecího tepla a současně toto teplo odvádí. Tukové mazání má menší účinek než mazání olejem a snáze se vytváří brusná kaše ze zbytků maziva a prachu nebo otěru. Ozubená kola pracující bez mazání, je vhodné naolejovat alespoň na začátku běhu kvůli snadnému zaběhnutí. Při záběru plastového kola s protilehlým kolem ocelovým snižuje opotřebení kola jestliže je vyrobeno z měkké oceli. Broušená a kalená ozubená kola se téměř neopotřebovávají, ať zabírají s kolem z kteréhokoliv plastu i za sucha.



Obr. 3-5 Ocelové a plastové soukolí [10]

3.4.6 Dynamika zatížení

Samotný záběr zubu jednou za otáčku kola má charakter dynamického zatěžování a i když se zdá, že vnější zatížení je konstantní, vznikají při běhu ozubeného kola četné vnější a vnitřní přídavné dynamické síly. Dobře tlumena jsou dynamická zatížení houževnatými plasty, např. PA nebo PUR. U ozubených kol vyrobených z tvrdých a méně houževnatých plastů dynamika zatížení výrazně zkracuje jejich životnost.

3.4.7 Obvodová rychlost

Při větších obvodových rychlostech vzniká větší vývin třecího tepla, vyšší teplota kola i zubových boků, rychlejší opotřebení, a tím kratší životnost ozubeného kola. Pro nemazaná soukolí plast-kov jsou běžně používané obvodové rychlosti do 5 až 8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, pro stejná soukolí mazaná olejem do 15 až 20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jsou-li obě ozubená kola z plastů, připouštějí se bez mazání rychlosti do 1 až 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nadměrná obvodová rychlost má za následek poškození zubových boků a tím i velké deformace.

4 TYPY PORUŠENÍ OZUBENÝCH KOL

Způsob a rychlost porušení plastového ozubeného kola závisí na provozních podmínkách, při kterých soukolí provozujeme. Dostupná literatura [3] uvádí následující typy porušení:

4.1 Adheze

Podíváme-li se na soukolí podrobněji, zjistíme, že vlivem vysokých místních tlaků dochází při styku zubů ozubeného kola k miniaturním svarovým spojením a jejich následnému odtrhávání. K nejrozsáhlejšímu poškození dochází v oblasti roztečné kružnice. Se stále se zvětšujícím poškozením roste na bocích zubů tření a tím i jejich teplota. Dochází k nadměrnému ohýbání zubu v oblasti nad roztečnou kružnicí, které může způsobit lomové poškození. Adheznímu opotřebením lze předejít oddělením stykových ploch spolu zabírajících boků zubů mazivem. Máme-li aplikaci, která nám nedovoluje použití maziva, je dobré vyrobit kolo z materiálu s nízkými třecími vlastnostmi (např. POM).

4.2 Abraze

Nečistoty obsažené v mazivu v podobě tvrdých částic nejčastěji podporují vznik abrazivního opotřebením. Tyto částice se dostávají do stykové oblasti záběru kol a způsobují úběr materiálu, po kterém zůstávají na bocích zubů nepatrné rýhy. K abrazi například dochází, je-li jedno kolo plastové plněné skleněnými vlákny a druhé je vyrobeno z měkkého kovu. Při dotyku velmi tvrdých skleněných vláken s měkkým kovem nastává veliký otěr a částice kovu vzniklé při otěru začnou působit jako brusivo.

4.3 Teplotní únava

Při provozu mazaného i nemazaného soukolí dochází k jeho teplotní únavě. Tato únava je způsobena především teplotními změnami v oblasti styku zubů. Z důvodu dobrých izolačních vlastností plastů se nemůže teplo vzniklé třením a deformacemi snadno odvést a dochází k místnímu navýšení teploty, což má za následek snížení pevnosti materiálu.



Obr. 4-1 Deformace zubu způsobená vysokou teplotou [3]

4.4 Tečení materiálu

Kontaktní namáhání a skluzu v oblasti záběru mají za následek velké zahřívání materiálu a tím i k jeho změknutí. K tečení materiálu dochází zpravidla v radiálním směru, což nemá příliš vážné důsledky na vlastnosti kola. Nastane-li tečení v axiálním směru dochází po velmi krátké době k lomovému porušení.

4.5 Lomové porušení

Lomové porušení způsobí jednorázové přetížení nebo únava materiálu. Při záběru ozubeného kola jsou zuby opakovaně ohybově namáhány, a toto namáhání způsobuje v oblasti kořene zubu vznik a šíření únavových trhlinek. Dosáhne-li některá trhlinka kritické velikosti, začíná se nekontrolovaně šířit a dochází k lomovému porušení. U ozubených kol vyrobených z materiálů s vysokou vrubovou houževnatostí se únavové trhliny šíří velmi pomalu a někdy se jejich růst zcela zastaví. Trhlinky se dokonce můžou objevit již po pár dnech provozu ozubeného kola, ale k lomu dochází většinou až po několika týdnech.



Obr. 4-2 Vylomení zubů způsobené přetížením [3]

4.6 Důlková koroze (pitting)

Pitting neboli důlková koroze se vyskytuje u plastových ozubených kol jen zřídka při překročení vyšších zatížení. Toto poškození má charakteristický vzhled ve formě důlků na stykových plochách zubů, zastavit ho lze snížením zatížení pod hodnotu odpovídající meznímu kontaktnímu tlaku.



Obr. 4-3 Důlková koroze (pitting) [12]

5 VÝPOČET OZUBENÝCH KOL

Výpočtové vztahy potřebné pro pevnostní návrh a kontrolu plastových ozubených kol jsou odvozeny ze vztahů, které se využívají pro kontrolu kol ocelových. Tento výpočet můžeme nalézt v normě ČSN 01 4686. Vzhledem k rozdílnému chování plastů a ocelí bylo nutno do výpočtu tuto skutečnost zahrnout a modifikovat výpočet ocelových kol pro aplikaci na kola plastová.

5.1 Ohybové namáhání

Při výpočtu považujeme zub za vetknutý nosník namáhaný prostým ohybem. Maximální ohybový moment je v okamžiku počátku záběru. Tento moment je způsoben normální silou působící na záběrové přímce. Výpočet platí pro ideálně tuhé zuby, které se při záběru kol nedeformují. Plastové zuby se ve skutečnosti ohýbají, proto je výpočet považován pouze za přibližný. [1]

5.2 Kontaktní namáhání

Při výpočtu Hertzova tlaku je potřeba znát Poissonovo číslo a modul pružnosti obou spoluzabírajících kol. U ocelí jsou tyto charakteristiky téměř konstantní, ale u plastů je výrazná závislost těchto charakteristik na velikosti napětí, frekvenci zatěžování zubu a na teplotě. Výpočet se provádí ve valivém bodě, protože právě tam je hodnota Hertzova tlaku největší. Jelikož mají plasty značně horší rozměrovou stabilitu, dochází vlivem nestálosti rozměrů ke změnám záběrových účinků a to se projeví na velikostech Hertových tlaků. Proto je nutno brát výpočet na kontaktní namáhání pouze za přibližný. [1]

5.3 Další možnosti výpočtu

Výpočet pro některé druhy plastů můžeme nalézt v literatuře [1]. Jsou zde uvedeny potřebné vztahy pro výpočet, diagramy ke stanovení koeficientů a přípustná zatížení, která jsou nutnou součástí výpočtu. Existuje i možnost zadat výpočet plastových ozubených kol firmám zabývajících se touto problematikou podrobněji. Tyto firmy mají na svých internetových stránkách uvedeny výpočtové programy, které jsou schopny po zadání všech potřebných údajů zdarma spočítat všechny výsledky potřebné k návrhu a kontrole plastového kola. Záporům těchto výpočtů je fakt, že firmy neuvádí podle jakých kritérií výpočet probíhal a tudíž nelze jejich výsledky nijak porovnávat. Další možností je využití metody konečných prvků (MKP), která umožňuje simulaci záběru ozubených kol. Pomocí této metody můžeme určit například maximální redukovaná napětí podle teorie HMH nebo deformace. Výsledky této metody je ale zapotřebí experimentálně ověřit a to nejlépe experimentem na reálném kole, které má stejné charakteristiky použité při řešení pomocí MKP.

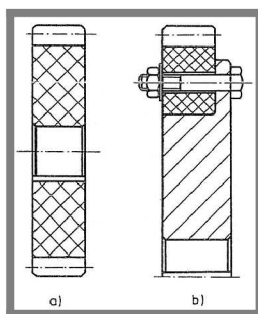
6 KONSTRUKCE A VÝROBA OZUBENÝCH KOL

6

6.1

6.1 Obráběná kola

Obráběná ozubená kola se zhotovují z tyčí, kotoučů nebo desek. Plné celistvé kotouče viz. Obr. 6-1a nám uspoří pracnost při obrábění. Šířku ozubení volíme obvykle 5 až 10 násobků modulu. Vyšší hodnoty šířky použijeme u materiálů o nižší tuhosti, aby se kola radiálním tlakem nebortila. Ozubení se zhotovuje klasickými způsoby obrábění a to odvalovacím frézováním nebo odvalovacím obrážením. Při návrhu ozubených kol větších rozměrů je možnost využít nalisování ozubeného věnce z plastu na kovový kotouč viz. Obr. 6-1b. [1]

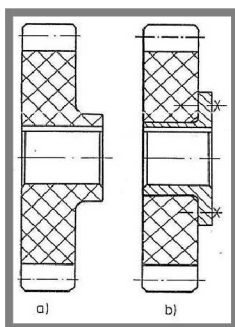


Obr. 6-1 Obráběná ozubená kola z plastů [1]

Celoplastové ozubené kolo Obr. 6-1a

Ozubený věnec z plastu přišroubovaný ke kovovému kotouči Obr. 6-1b

Upevnění kola na hřídel provedeme jedním nebo dvěma pery, pootočenými vůči sobě o 120 nebo 180°. Drážky pro pero v plastu mají mít zaoblené vnitřní hrany, omezí se tím vrubový účinek. Tam, kde by byl tlak v drážce pera příliš vysoký prodloužíme náboj na jednu nebo na obě strany viz. Obr. 6-2a, popřípadě u velkých kol vsuneme do kola kovový přírubový náboj, s nímž jej sešroubujeme Obr.6-2b. [1]



Obr. 6-2 Úpravy pro snížení tlaku v drážce pro pero [1]

Jednostranně prodloužený náboj Obr. 6-2a

Vsazený kovový náboj Obr. 6-2b

Obrábění ozubených kol se využívá u materiálů, které nelze vstříkovat nebo lisovat, např. vysoce molekulární polyethylen (PE) a ve speciálních případech polyimid (PI). Obrábění rovněž využijeme u kusové výroby ozubených kol a pro velmi rozměrná kola. [1]

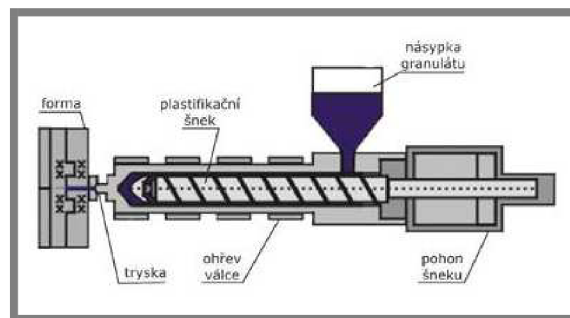
6.2 Vstřikovaná ozubená kola

Vstřikování ozubených kol je dnes velmi moderní a progresivní způsob výroby. Jeho hlavní výhoda spočívá v jednoduchém principu a v možnosti vyrobit téměř neomezený tvar zubů ozubených kol. Nevýhodou je nutnost vyrobení celkem nákladné formy, proto se tato technologie používá jen pro větší série výrobků (řádově desítky tisíc). Pro menší série je potřeba vyrobit ozubená kola klasickými metodami obrábění.

6.2.1 Princip vstřikování

Výroba začíná přípravou plastových granulí, kterými plníme násypku vstřikovacího lisu. Granule nasypeme do komory, kde je plastifikačním šnekem tlačena do válce, ve kterém se ohřívá na příslušnou teplotu a ve formě taveniny vstupuje do trysky, kterou je vstřikována do formy. Po řádném vychlazení se forma otevírá a vyhazuje hotový výrobek. Celý proces se opakuje stále dokola. [4]

Ke vstřikování se využívají hydraulické lisy, které nám zajistí dostatečný tlak potřebný pro správné vstříknutí roztaveného plastu do kovové formy.



Obr. 6-3 Princip vstřikování plastů [4]

Důležitou součástí při vstřikování je forma, která mimo své dutiny (má stejný tvar jako vstřikované kolo), musí obsahovat ještě další technologické prvky jako jsou vtokový a chladicí systém. [4]



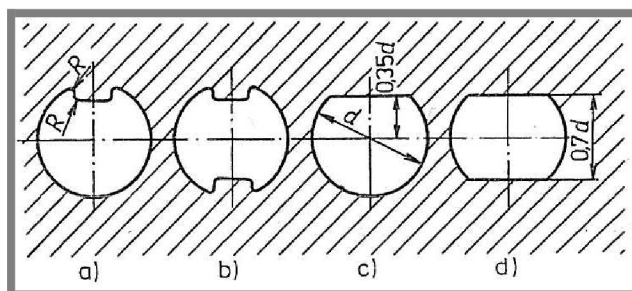
Obr. 6-4 Forma ozubeného kola [8]

Pokud je to potřeba, je možné simulovat plnění vtokového systému a dutiny výrobku. Takto lze stanovit optimální způsob plnění formy a ovlivnit výsledné vlastnosti plastového dílu ještě před zahájením výroby. [4]

6.2.2 Konstrukce vstřikovaných ozubených kol

Pro větší výrobní série, běžně do průměru 100 až 150 mm se ozubená kola vyrábějí vstřikováním z plněných i neplněných termoplastů. V jednoduchých formách, viz. Obr.6-4 vyrobených vtačením ocelového modelu ozubeného kola do roztavené zinkové slitiny se vyplatí vstřikovat kola i v malých sériích, kolem několika set kusů. [1]

Upevnění na hřídeli navrhujeme jednoduché, nejlépe jedním či dvěma pery. Pro nižší zatížení a menší kola se může pero vystříknout v celku s kolem, Obr.6-5a,b, ale drážka v hřídeli musí být průběžná až na konec hřídele a její hrany musí být zaobleny nebo zkoseny. Jiný způsob je zploštění otvoru v kole a odpovídající sfrézování hřídele, Obr. 6-5c,d. [1]



Obr. 6-5 Upevnění vstřikovaných kol na hřídeli [1]

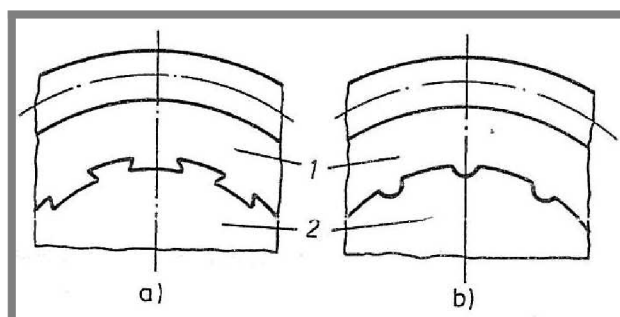
Pero vystříknuté vcelku s kolem Obr. 6-5a

Protilehlá pera vystříknutá vcelku s kolem Obr. 6-5b

Jednostranně zploštělý otvor Obr. 6-5c

Oboustranně zploštělý otvor Obr. 6-5d

Ozubená kola, která jsou jako celek málo tuhá, nebo kola u nichž se vyžaduje velká rozměrová stabilita a přesnost záběru se řeší jako kombinovaná. Na disk kola nebo náboj, který je z oceli, hliníku, litiny aj. můžeme také nastříknout věnec z plastu. Pootočení věnce vůči vložce a jeho uvolnění při zahřátí zabraňují drážky po obvodě kovové vložky. Oba cíle dobře splňuje provedení podle Obr. 6-6a, ale úprava kovové vložky je složitější. Jednodušší úprava je na Obr. 6-6b. [1]



Obr. 6-6 Nastříknutí ozubeného věnce z termoplastu na kovový kotouč [1]

Složitější provedení Obr. 6-6a

Jednodušší provedení Obr. 6-6b

1... věnec z plastu

2... kovový kotouč

7 PŘEHLED A ROZBOR LITERATURY

Následující přehled literatury uvádí některé zdroje, které se zabývají problematikou plastových ozubených kol, ale i ostatními plastovými součástmi používanými ve strojírenství.

Kniha **Strojní součásti z plastů** [1] jejímž autorem je Ing. Jan Kolouch pojednává o základních vlastnostech plastových materiálů a jejich výhodách i nevýhodách. Dále pokrývá nejpoužívanější strojní součásti vyrobené z plastů. Popisuje zde např. problematiku plastových šroubů, spojek, ozubených kol, těsnění apod. U každé této součásti je uveden její výpočet s podrobnými grafy a hodnotami potřebnými k jejich pevnostní kontrole. Tato literatura poskytuje dostatečné množství informací potřebné pro základní pochopení chování plastů a plastových strojních součástí.

Informace lze samozřejmě nalézt i na internetu. Příkladem může být článek **Ozubená kola** [2], který můžeme najít ve známé technické literatuře MM Průmyslové spektrum. Autor zde popisuje pouze problematiku plastových kol. Uvádí výhody i nevýhody těchto kol, vlastnosti plastů, vývojové trendy a také nejčastější oblasti využití plastových soukolí. Komplexnější pohled na plastová ozubená kola poskytuje bakalářská práce **Plastová ozubená kola a jejich analýza pomocí MKP** [3]. Autor se ve své práci zaměřuje na využití metody konečných prvků k analýze plastových ozubených kol. Dále uvádí kontrolu a měření, způsoby výroby, typy porušení a materiály těchto kol.

Kvalitní informace a poradenství v oblasti plastů poskytují i firmy zabývající se touto problematikou. Tyto firmy jsou schopny prostřednictvím svých internetových stránek a informačních dotazníků vyřešit všechny problémy a komplikace, které mohou nastat při návrhu strojních součástí z plastů.

8 VÝVOJOVÉ TRENDY

V současné době dochází v oblasti plastových ozubených kol k dalšímu posunu vpřed a to nejen v oblasti výpočtů těchto kol, tak i jejich výroby. Existují výpočetní programy, které stále více zohledňují materiálové chování plastů vyplývající z rozdílných vlastností oproti kovům a napomáhají tak ke správnému dimenzování ozubených kol. Ve výrobě se pokrok příznivě projevuje u vstřikování ozubených kol. Možnost simulace tokových vlastností plastů má vliv na vyšší kvalitu vyráběných kol. [2]

V kusové a malosériové výrobě se začalo s výhodou využívat polotovarů z odlévatelných typů polyamidů (PA) ve formě tyčí větších průměrů nebo silnostěnných trubek. Tato technologie je založena na beztlakovém odlévání a umožňuje výrobu tyčových polotovarů s axiálně zalitým kovovým jádrem z oceli, mosazi nebo hliníku (viz. Obr. 8-1). Průřezy jader jsou vyráběny jako kruhové nebo šestihranné. Povrch jader je opatřen kruhovými drážkami, do kterých odlévaný plast zateče a zabrání tak axiálnímu posunutí kovového jádra. Takto vyrobený polotovar lze využít k výrobě ozubených kol zvolené šíře, kde kovové jádro tvoří náboj a plastový prstenec slouží k výrobě ozubení. [2]



Obr. 8-1 Ozubená kola z plastu se zalitým kovovým jádrem [2]

Vývoj plastových ozubených kol stále pokračuje, a to jak v oblasti konstrukční tak materiálové. Zajímavých výsledků při svých výzkumech dosáhl např. německý Fraunhoferův institut, zabývající se vývojem ozubených kol z plastů, avšak s ocelovými zuby. Dosavadní výsledky tohoto výzkumu ukazují, že ozubená kola této konstrukce jsou mnohem tišší a lacinější než konvekční kola ocelová. Při měřeních bylo zjištěno, že pevnostně zatím dosahují 80% hodnot kol ocelových. Inspirací zmíněného vývoje byly ozubená kola vyráběná zhruba před 100 lety, kde byly kovové zuby zasazovány do dřevěného náboje. [2]

9 ZÁVĚR

Tato práce popisuje problematiku plastových ozubených kol a podává přehled současného stavu poznání v této oblasti. Výhodné vlastnosti těchto kol se stávají stále více populárnější a proto se plastová kola začínají objevovat v mnoha aplikacích. Mezi tyto vlastnosti patří:

- nízká hmotnost
- schopnost tlumení hluku
- tlumení vibrací a rázů
- dobré kluzné vlastnosti (samomaznost)
- tuhost a tvrdost při dostatečné houževnatosti
- výborná chemická a korozní odolnost
- nízká otěruvzdornost a odolnost proti opotřebení
- nevyžadují větší údržbu

Plastová ozubená kola se používají pro přenosy menších sil při nižších obvodových rychlostech. Těmto podmínkám převážně odpovídají převodové nebo pohonné mechanismy strojů a zařízení spadající do oblasti lehkého strojírenství. Jejich využití lze nalézt i u zařízení, u kterých nepředpokládáme dlouhou životnost. Tímto docílíme snížení hmotnosti a celkových nákladů potřebných k realizaci zařízení.

Chování plastových kol je velmi odlišné od chování kol ocelových. S tímto souvisí i způsob jejich návrhu a kontroly. Celkový proces konstrukce je velmi složitý, protože nejsou k dispozici normativy, které by ho usnadňovaly.

Při návrhu a konstrukci plastových ozubených je nutné brát v potaz zásady uvedené v této práci. V opačném případě hrozí poškození celého převodu a tím i nefunkčnost navrhovaného zařízení.

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ING. JAN KOLOUCH. *Strojní součásti z plastů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981. 260 s. ISBN 04-234-81.
- [2] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Ozubená kola* [online]. Vydání 4/2006, URL:< <http://www.mmspektrum.com/pdf/c060412.pdf> >[cit. 9-5-2008].
- [3] DYMÁČEK, M. *Plastová ozubená kola a jejich analýza pomocí MKP*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 37 s.
- [4] SOTALLIA a.s. *Princip vstřikování plastů* [online]. URL:<<http://www.sotallia.com/princip-vstrikovani-plastu.html>>[cit. 9-5-2008].
- [5] SEZNAM ENCYKLOPEDIÉ. *Plasty* [online]. URL:<<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/82372-plasty>>[cit. 9-5-2008].
- [6] GE PLASTICS. *A Guide to Plastic Gearing* [online]. 2006. URL:<http://kbam.geampod.com/KBAM/Reflection/Assets/Thumbnail/7106_8.pdf>[cit. 9-5-2008].
- [7] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ, Fakulta strojního inženýrství VUT Brno – přednáška předmětu Konstruování strojů – převody – Převody, převody ozubenými koly. URL:<<http://www.uk.fme.vutbr.cz>>[cit. 9-5-2008].
- [8] KLEISS GEARS, Inc. *Molding* [online]. URL:<<http://www.kleissgears.com/molding.html>>[cit. 9-5-2008].
- [9] INTECH CORPORATION. *Spur gears* [online]. URL:<http://www.intechpower.com/Spur_Gears.html>[cit. 9-5-2008].
- [10] ZYCON GLOBAL SERVICES. *Gears* [online]. URL:<<http://www.zycon.com/ShowImage.asp?compid=220508&iid=2776>> [cit. 9-5-2008].
- [11] ANTONÍN PÁRTL – Výroba ozubených kol. *Čelní soukolí* [online]. URL:< <http://www.ozubeni.cz>>[cit. 9-5-2008].
- [12] XT 4 – VALVES. XT - Werkstatt. *Pitting* [online]. URL:< http://www.xt600.de/xt_werkstatt/+sonstiges/-horror-pics/index.htm> [cit. 9-5-2008].
- [13] WIKIPEDIA .Otevřená encyklopedie. *Polyethylen* [online]. URL:< <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyethylen>>[cit. 9-5-2008].

- [14] VŠB – TU OSTRAVA, Fakulta bezpečnostního inženýrství.
Stroje a zařízení – Železo, oceli [online].
URL: <<http://www.fbi.vsb.cz/shared/uploadedfiles/fbi/zelezo.pdf>>
[cit. 9-5-2008].
- [15] SCHWARTZ GmbH. *Technické plasty* [online].
URL: <http://www.schwartzplastic.com/technische_kunststoffe/czech/index.htm> [cit. 9-5-2008].
- [16] JOSEF GRUBER. SPŠS Plzeň. *Převody ozubenými koly* [online].
URL: <http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/prezent/12ozub.pps> [cit. 9-5-2008].

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 0-1 Ukázka plastových ozubených kol [16]	12
Obr. 1-1 Makromolekulární řetězec a krystalická mřížka ([14] a [15])	13
Obr. 2-1 Nastříknutý věnec na kovový kotouč [10]	15
Obr. 3-1 Používané druhy čelních ozubených soukolí [6]	16
Obr. 3-2 Standartní evolventní ozubení [12]	16
Obr. 3-3 Příklad použití plastových ozubených kol [9].....	17
Obr. 3-4 Korigovaná kola s posunutím +V a –V [16]	18
Obr. 3-5 Ocelové a plastové soukolí [11].....	19
Obr. 4-1 Deformace zubu způsobená vysokou teplotou [3].....	20
Obr. 4-2 Vylomení zubů způsobené přetížením [3]	21
Obr. 4-3 Důlková koroze (pitting) [13]	21
Obr. 6-1 Obráběná ozubená kola z plastů [1]	23
Obr. 6-2 Úpravy pro snížení tlaku v drážce pro pero [1].....	23
Obr. 6-3 Princip vstřikování plastů [4].....	24
Obr. 6-4 Forma ozubeného kola [8]	24
Obr. 6-5 Upevnění vstřikovaných kol na hřídeli [1].....	25
Obr. 6-6 Nastříknutí ozubeného věnce z termoplastu na kovový kotouč [1]	25
Obr. 8-1 Ozubená kola z plastu se zalitým kovovým jádrem [2]	27
Tab. 2-1 Vlastnosti plastů pro výrobu ozubených kol [2]	14